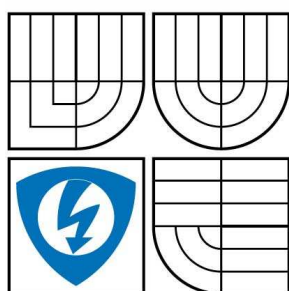


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

CHYBY V MRI METODÁCH MERANIA DIFÚZNÍCH KOEFCIENTOV

TITLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jozef Uriča

VEDOUĆÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Eva Gescheidtová, CSc.

BRNO 2010

Anotácia

Diplomová práca chyby v MRI metódach merania difúzných koeficientov sa zaoberá preštudovaním merania difúzií metódami NMR, špecifikuje miesta príčiny vzniku určenia difúzných koeficientov. Hlavnou funkciou programu je počítanie b -faktoru a difúzneho koeficientu. Program je vhodný na simuláciu vplyvu zmien parametrov merania difúzných koeficientov a je možné simulovať napr. zmeny len jedného gradientu prípadne dobehu gradientných impulzov.

Kľúčové slová: NMR, MRI, difúzne meranie, difúzia, DWSE

Abstract

Diploma thesis Errors in MRI methods for measuring diffusion coefficients a study of measurement of diffusion NMR methods, specifies the location, causes, origination diffusion coefficients. The main function of the program is to simulate changes parameters measurement of diffusion coefficients and allows for example only one gradient or runs down gradient pulses.

Keywords: NMR, MRI, diffusion measurement, diffusion, DWSE

Prehlásenie

Prehlasujem že , svoju diplomovú prácu na téma Chyby v MRI metodách merania difúzných koeficientov som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si úplne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa

.....

podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcej diplomovej práce prof. Ing. Eve Gescheidtovej, CSc.
a prof. Ing. Karlu Bartuškoví, DrSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní môjho semestrálneho projektu.

V Brne dňa

.....

podpis autora

Abecedný prehľad použitých veličín a symbolov

b	b -faktor
D	difúzny koeficient
G	gradient
G_D	difúzny gradient
G_0	statický gradient
G_R	relatívna hodnota gradientu
G_P	relatívna hodnota gradientu
B	vektor indukcie magnetického poľa
M	vektor magnetizácie jadier
M₀	vektor magnetizácie jadier v teplotnej rovnováhe
M_E	hodnota a echa s gradientami
M_x, M_y, M_z	zložky vektoru magnetizácie jadier
r	polohový vektor-miesto jedného vzorku
T_2	priečny relaxačný čas
TE	čas echa (Time Echo)
t_D	difúzny čas
x, y, z	priestorové súradnice laboratórnej sústavy
y	stredná vzdialenosť difúzie
δ	dĺžka gradientu
δ_1	dĺžka od 90° impulzu k počiatku gradientu,
δ_2	dĺžka od konce gradientu do 180° impulzu
δ_B	relatívna chyba b -faktoru
δ_D	relatívna chyba difúzie
Δ	časový interval medzi počiatkami gradientných impulzov
ξ	relatívna chyba negatívneho gradientu

ω kmitočet rezonancie jadier- Larmorova frekvencia

Abecedný prehľad použitých skratiek

DWSE	Diffusion-weighted spin echo, difúzne váhové spinové echo
MR	Magnetic Rezonance
MRI	Magnetic Rezonance Imaging
NMR	Nuclear Magnietic Resonance
PFGSE	Pulse Field Gradient Echo
RF	Radio Frequency

Zoznam použitých obrázkov

Obrázok 1. PFG-SE NMR techniku pre meranie difúzie v heterogénnych systémov [8].	13
Obrázok. 2 Stejskal-Tanner zobrazovacia sekvencia difúzne viazaného spinového echa.	18
Obrázok. 3 Zobrazovacia sekvencia difúzne viazaného spinového echa	19
Obrázok. 4 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými priebehmi.	20
Obrázok. 5 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými, lichobežníkovými a polo-sínosovými priebehmi a vzťahy pre výpočet b -faktorov	21
Obrázok. 6 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania (základné parametre)	25
Obrázok. 7 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_p = 101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 101 \cdot 10^{-3}$)	26
Obrázok. 8 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_p = 99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 99 \cdot 10^{-3}$)	27
Obrázok. 9 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_p = 101 \cdot 10^{-3}$)	28
Obrázok. 10 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_p = 99 \cdot 10^{-3}$)	29
Obrázok. 11 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_R = 101 \cdot 10^{-3}$)	30
Obrázok. 12 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_R = 99 \cdot 10^{-3}$)	31
Obrázok. 13 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($\delta = 4.95 \cdot 10^{-3}$)	32
Obrázok. 14 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($\delta = 5.05 \cdot 10^{-3}$)	33
Obrázok. 15 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 10^{-3}$)	34
Obrázok. 16 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$)	35
Obrázok. 17 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$)	36
Obrázok. 18 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$)	37
Obrázok. 19 6-intervalová PFG NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými priebehmi.	39
Obrázok. 20 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_p = -100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$)	40
Obrázok. 21 vzorka voda so síranom pri použití $G_x = 10\text{KDAC}$ (naľavo), $G_x = 0\text{KDAC}$ (v strede), $G_x = -10\text{KDAC}$ (v pravo).	42
Obrázok. 22 Výstupný obraz z 3 obrazov($G_x = -10\text{K}$, $G_x = 0\text{K}$, $G_x = 10\text{K}$)	44
Obrázok. 23 Upravený výstupný obraz z 3 obrazov($G_x = -10\text{K}$, $G_x = 0\text{K}$, $G_x = 10\text{K}$)	44

Obrázok. 24 Výstupné obrazy z 3 obrazov: ($G_x = -10K, G_x = 0K, G_x = 10K$) - naľavo hore
 ($G_x = -15K, G_x = 0K, G_x = 15K$)-napravo hore, ($G_x = -20K, G_x = 0K, G_x = 20K$) - naľavo dole
 ($G_x = -25K, G_x = 0K, G_x = 25K$) - napravo dole 45

Obrázok. 25 Výstupné obrazy z kladného a nulového gradientu v osi G_x :
 ($G_x = -10K, G_x = 0K, G_x = 10K$) - naľavo hore, ($G_x = -15K, G_x = 0K, G_x = 15K$)- napravo hore,
 ($G_x = -20K, G_x = 0K, G_x = 20K$) - naľavo dole, ($G_x = -25K, G_x = 0K, G_x = 25K$)- napravo dole . 51

Obrázok.26 výstupné obrazy zo záporného a nulového gradientu v osi G_x :
 ($G_x = -10K, G_x = 0K, G_x = 10K$) - naľavo hore, ($G_x = -15K, G_x = 0K, G_x = 15K$)- napravo hore,
 ($G_x = -20K, G_x = 0K, G_x = 20K$) - naľavo dole, ($G_x = -25K, G_x = 0K, G_x = 25K$)- napravo dole . 57

Obrázok. 27 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia
 a.) kladné obdĺžnikové gradienty b.) záporné obdĺžnikové gradienty 62

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 - Použitie obdĺžnikových gradientov	38
Tabuľka 2 - Použitie záporných obdĺžnikových gradientov	41
Tabuľka 3 - Hodnoty difúzných gradientov G_D pre jednotlivé G_x, G_y, G_z	43
Tabuľka 4 - Hodnoty b -faktorov pre jednotlivé G_x	43
Tabuľka 5 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_x)	46
Tabuľka 6 - Hodnoty b -faktorov pre jednotlivé G_y	47
Tabuľka 7 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_y)	47
Tabuľka 8 - Hodnoty b -faktorov pre jednotlivé G_z	48
Tabuľka 9 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_z)	49
Tabuľka 10 - Vyhodnocovanie z 3 obrazov (G_x, G_y, G_z)	50
Tabuľka 11 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného gradientu (G_x)	52
Tabuľka 12 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného (G_y)	53
Tabuľka 13 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného gradientu (G_z)	54
Tabuľka 14 - Vyhodnocovanie z nulových kladných gradientov (G_x, G_y, G_z)	55
Tabuľka 15 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného gradientu (G_x)	58
Tabuľka 16 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného (G_y)	59
Tabuľka 17 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného gradientu (G_z)	60
Tabuľka 18 - Vyhodnocovanie z nulových a záporných gradientov (G_x, G_y, G_z)	61

Zoznam grafov

Graf č.1 Závislosť difúzie D od gradientu G_x	46
Graf č.2 Závislosť difúzie D od gradientu G_y	48
Graf č.3 Závislosť difúzie D od gradientu G_z	49
Graf č.4 Porovnanie závislostí difúzie D od gradientov $G_x G_y G_z$	50
Graf č.5 závislosť difúzie D od gradientu G_x pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu	52
Graf č.6 závislosť difúzie D od gradientu G_y pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu	54
Graf č.7 Závislosť difúzie D od gradientu G_z pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu.....	55
Graf č.8 Závislosť difúzie D od gradientov $G_x G_y G_z$	56
Graf č.9 Závislosť difúzie D od gradientu G_x pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu .	58
Graf č.10 Závislosť difúzie D od gradientu G_y pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu	59
Graf č.11 Závislosť difúzie D od gradientu G_z pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu	60
Graf č.12 Závislosť difúzie D od gradientov $G_x G_y G_z$	61
Graf č.13 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_x	63
Graf č.14 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_y	64
Graf č.15 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_z	65

Obsah

1. Úvod	12
2. PFG-SE metóda	13
3. Impulzná sekvencia MR zobrazenia.....	18
4. Stanovenie chýb difúzných koeficientov – experimentálna časť	20
4.1.) PFGSE NMR sekvencia - obdĺžnikové gradienty	20
4.1.1a.) Základné parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie pre vzorku vody	25
4.1.1b.) Gradienty G_p a G_R a zvyšujem o 1%.....	26
4.1.1c.) Gradienty G_p a G_R a znižujem o 1%	27
4.1.2a.) G_p zvyšujem o 1% G_R = konst.....	28
4.1.2b.) G_p znižujem o 1% G_R = konst.....	29
4.1.2c.) G_p = konst G_R = zvyšujem o 1%.....	30
4.1.2d.) G_p = konst G_R = znižujem o 1%.....	31
4.1.3a.) δ znižujem o 1%.....	32
4.1.3a.) δ zvyšujem o 1%	33
4.1.4a.) Statický gradient $G_0 = 10^{-3}$	34
4.1.4b.) Statický gradient $G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$	35
4.1.4c.) Statický gradient $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$	36
4.1.4d.) Statický gradient $G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$	37
4.2.) PFGSE NMR sekvencia – invertované obdĺžnikové gradienty	39
4.2.1.) Relatívna hodnota gradientu $G_p = -100 \cdot 10^{-3}$ a $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$	40
4.3.) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov	42
4.3.1) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_x	42
4.3.2) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_y	47
4.3.3) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_z	48
4.4.1) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu	51
4.4.1) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_x	51

4.4.2) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_y	53
4.4.3) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_z	54
4.4.4) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_x	57
4.4.5) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_y	59
4.4.6) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_z	60
4.4.5) Porovnanie metód vyhodnocovania z troch obrazov a z dvoch obrazov.....	62
5. Záver	66
6. Použitá literatúra	68

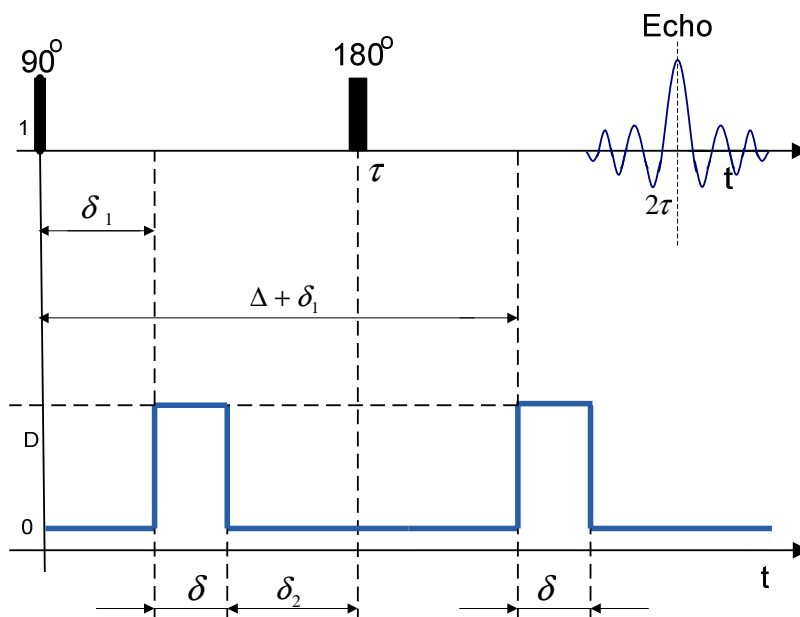
1. Úvod

Zobrazovanie na základe jadrovej magnetickej rezonancie je dôležitá metóda pre štúdium tkanív a molekúl. Jeho diagnostické výsledky v medicíne sú nepopierateľné. Metóda umožňuje MR meranie pomalého pohybu jadier a molekúl ($D = 10^{-10}$ - $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Vedomosti o rozšírení a ostatné pohyby jadra rôznych látok v poréznych materiáloch v rámci vyšetrení môže priniesť nové diagnostické výsledky. Prvá technika pre meranie difúzie v homogénnych materiáloch bola zavedená Stejskal a Tanner [1]. Ich impulzné pole gradientu spin-echo metódy (PFG-SE), ktorá používa gradient magnetického poľa, je obmedzené požiadavkou mať dostatočne dlhé relaxačné časy T_1 a T_2 . V heterogénnych biologických materiáloch relaxačné časy sú krátke (v jednotkách ms). V heterogénnych systémoch, kde relaxačná doba T_2 je kratšia ako T_1 kde D je malý ($D \ll 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), môže byť výhodné použitie PFG stimulovanej spin-echo (SSE) sekvencie [2]. Preto boli zavedené sofistikovanejšie metódy, ktoré eliminujú vplyv magnetickej susceptibility biologických materiálov [3-6]. Sú založené na použití stimulovaného echa, pre ktoré difúzne časy môžu byť rozšírené dokonca i v materiáloch s krátkym relaxačným časom T_2 . Počas PFG-SSE experimentu, informácia o otočení fáz je uložená v smere z-osy za časovým intervalom medzi impulzmi gradientu. Tento časový interval obmedzuje relaxačný čas T_1 . Tieto techniky eliminujú vplyv takzvaných krížových podmienok vzťahujúcich sa k priestorovo-závislému gradientu základného pola MR systému. Impulzná sekvencia [7], založená na spin echo je zameraná na zrušenie krížovej oblasti medzi použitými a internými magnetickými gradientami pomocou impulzných párov bipolárneho gradientu. Táto sekvencia je menej citlivá prevod nechcenej koherencie ciest pri používaní navrhovanej fáze cyklu a klesajúcej sledovanej doby použitím pomocou najkratšej možnej impulznej sekvencie[8].

Metoda navrhnutá v práci využíva PFG-SE impulzné sekvencie pre štyri alebo tri veličiny difúzneho gradientu a umožňuje výpočet v jednoduchom móde difúznej konštanty meraného materiálu. Tvarované impulzy v postupnosti zobrazovania impulzu, sú výrazne dlhšie ako v difúznom meraní pomocou NMR spektrometrov, výrazne predĺžia dobu difúzie, ktorá je vždy obmedzená relaxačným časom T_1 meranej látky. Pre meranie látok s krátkym relaxačným časom T_1 je výhodné znížiť difúzny čas. Našou snahou je znížiť túto dobu na minimum a zároveň zachovať dostatočnú presnosť pri meraní difúzných koeficientov[8].

2. PFG-SE metóda

Pre meranie difúzných koeficientov atómov a molekúl v homogénnych kvapalín a tuhých látok, je použitá PFG-SE Pulse Field Gradient Echotechnika. Princíp merania v súčasnej spin-echo impulznej sekvencii spočíva v použití dvoch difúzných gradientov [8]. Prvý z nich je umiestnený medzi dvoma impulzami RF a slúži na od fázo vanie definovaným spôsobom a druhý gradient sa uplatňuje po 180° impulze slúži na opätovné sfázovanie (obr.1).



Obrázok 1. PFG-SE NMR techniku pre meranie difúzie v heterogénnych systémov [8].

Pre celú dobu merania, na rotácie pôsobí statické magnetické pole gradientu G_0 vzhľadom na magnetickú susceptibilitu meraného materiálu. Mal by byť minimalizovaný účinok tejto oblasti na presnosť merania difúzneho koeficientu. Priebeh efektívnych gradientov aplikovaných v tejto technike je ukázaný na (obr. 1) a môže byť popísaný vzťahmi

$$\begin{array}{lll}
 G_0 & \text{for} & 0 < t < \delta_1, \\
 G_0 + G_D & \text{for} & \delta_1 < t < \delta_1 + \delta < \tau, \\
 G_0 & \text{for} & \delta_1 + \delta < t < \delta_1 + \Delta < 2\tau, \\
 G_0 + G_D & \text{for} & \delta_1 + \Delta < t < \delta_1 + \Delta + \delta < 2\tau, \\
 G_0 & \text{for} & \delta_1 + \Delta + \delta < t < 2\tau.
 \end{array}$$

(2.1)

Ak sa v dôsledku rozptylu rotácie pohybujú náhodne, magnetizáciu M možno opísať jednoduchým exponenciálnou rovnicou

$$M = M_0 e^{bD},$$

(2.2)

kde M_0 je intenzitou signálu bez difúzie (napr. meranej sekvencie bez oboch difúzných gradientov a statického gradientu magnetického poľa G_0). Konštanta b (taktiež nazývana b -faktor) poskytuje impulznej sekvencie citlivosť na rozptyl a je daná integrálom

$$b = -\gamma^2 \int_0^{2\tau} \left[\int_0^t G(t') dt' \right]^2 dt'. \quad (2.3)$$

Rovnica (2.3) sa používa na výpočet b -faktoru impulznej sekvencií pre každý tvar krivky gradientu. Pre navrhovanú techniku [1], b -faktor môže byť odvodený ako

$$b = -\gamma^2 \left\{ \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) G_D^2 - \delta \left[(\delta_1^2 + \delta_2^2) + \delta(\delta_1 + \delta_2) + \frac{2\delta^2}{3} - 2\tau^2 \right] G_D G_0 + \frac{2}{3} \tau^3 G_0^2 \right\}. \quad (2.4)$$

Po substitúcií

$$\begin{aligned} a_1 &= -\gamma^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right), \\ a_2 &= \gamma^2 \delta \left[(\delta_1^2 + \delta_2^2) + \delta(\delta_1 + \delta_2) + \frac{2\delta^2}{3} - 2\tau^2 \right], \\ a_3 &= -\gamma^2 \frac{2}{3} \tau^3, \end{aligned}$$

vzťah (2.4) možno prepísať do tvaru

$$b = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 - a_2 G_D G_0 + a_3 G_0^2]. \quad (2.5)$$

Pre pokles veľkosti spinových ech to bude vyzeráť takto

$$\ln \left(\frac{M_{G_D}}{M_0} \right) = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 - a_2 G_D G_0 + a_3 G_0^2] D, \quad (2.6)$$

$$\ln \left(\frac{M_{G_D}}{M_{0=0}} \right) = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 - a_2 G_D G_0 + a_3 G_0^2] D. \quad (2.7)$$

Difúzny koeficient v heterogénnych materiáloch sa vypočítava vzťahom (2.7) a nesie chybu, ktorá je v dôsledku prekročenia termu.

Relatívna neistota určenia difúzneho koeficientu D pre štandardnú sekvenciu spinového-echo, ako je uvedené na obrázku 1 vyjadruje rovnica (2.7), predpokladá, že nesie chyby, ktoré vznikajú iba z NMR úrovne, a môže sa odhadnúť pomocou vzorca

$$\delta_D \frac{\Delta D}{D} = \frac{2\delta_M}{\ln\left(\frac{M_{G_D}}{M_{G_D=0}}\right)}, \quad (2.8)$$

kde δ_D je relatívna chyba difúzneho koeficientu merania a δ_M je relatívna chyba v určení spin-echo amplitúdy. Predpokladá sa, že relatívne chyby stanovené spin-echo amplitúdy M_{G_D} , M_{-G_D} a $M_{G_D=0}$ sú si rovné. Odmeraním spin-echo hodnôt M_{G_D} , M_{-G_D} a $M_{G_D=0}$ a vypočítaním podľa vzťahu (2.7) v tomto prípade relatívnej chyby v dôsledku chyby pri meraní je možné vypočítať z troch pokusov difúzných koeficientov podľa vzťahov

$$\ln\left(\frac{M_{G_D} M_{-G_D}}{M_{G_D=0}^2} = -2\gamma^2 a_1 G_D^2 D\right), \quad (2.9)$$

$$D = \frac{\ln\left(\frac{M_{G_D} M_{-G_D}}{M_{G_D=0}^2}\right)}{-2\gamma^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3}\right) G_D^2}. \quad (2.10)$$

V tomto prípade relatívna chyba v dôsledku chyby pri meraní hodnoty signálu NMR je daná vzťahom

$$\delta_D = \frac{4\delta_M}{\ln\left(\frac{M_{G_D} M_{-G_D}}{M_{G_D=0}^2}\right)}. \quad (2.11)$$

Ak sú veľkosti pozitívnych a negatívnych gradientov rôzne, budú vznikať systematické chyby v meraniach difúzneho gradientu. Predpokladáme, že rozsah veľkosť negatívnych difúzných gradientov sa bude líšiť od rozsahu pozitívnych gradientov, a to podľa

$$-G_D = (1 \div \xi) G_D,$$

kde ξ je relatívna chyba negatívneho gradientu

$$\xi = \frac{\Delta G_D}{G_D},$$

pre G_D -a G_D sa vzťah (2.5) zmení na vzťahy

$$b_{+G_D} = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 - a_2 G_D G_0 + a_3 G_0^2], \quad (2.12)$$

$$b_{-G_D} = -\gamma^2 [a_1 (1 + \xi)^2 G_D^2 + a_2 (1 + \xi) G_D G_0 + a_3 G_0^2], \quad (2.13)$$

a vzťah (2.7) sa zmení na formy

$$\ln \left(\frac{M_{G_D}}{M_{G_D=0}} \right) = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 - a_2 G_D G_0 + a_3 G_0^2] D, \quad (2.14)$$

$$\ln \left(\frac{M_{-G_D}}{M_{G_D=0}} \right) = -\gamma^2 [a_1 (1 + \xi)^2 G_D^2 + a_2 (1 + \xi) G_D G_0 + a_3 G_0^2] D. \quad (2.15)$$

Keď je relatívna chyba difúzneho koeficientu berie do úvahy tri merania (pre G_D , $-G_D$ a $G_D = 0$) potom difúzny koeficient možno vypočítať zo vzťahu

$$\ln \left(\frac{M_{G_D} M_{-G_D}}{M_{G_D=0}} \right) = -2\gamma^2 \left(a_1 G_D^2 + a_1 G_D^2 \xi + \frac{a_2}{2} G_D G_0 \xi \right) D. \quad (2.16)$$

Z porovnania vzťahov (2.9) a (2.16) je zrejmé, že chyba b -faktoru bude daná súčtom relatívnej chyby $a_1 G_D^2 \xi$, ktorá je nezávislá na gradiente G_0 , a chyby $a_2/2 G_D G_0 \xi$. Pri použití menších veľkostí difúzných gradientov, môže byť významná druhá zložka chyby. Na druhú stranu sa skladá zo štyroch meraní difúznymi gradientami G_D , $-G_D$, $2G_D$ a $-2G_D$. Ak sčítame výsledky z prvých dvoch meraní hodnôt G_D a $-G_D$ (s relatívnou chybou ξ) získame

$$\ln \left(\frac{M_{2G_D}}{M_0} \right) + \ln \left(\frac{M_{-2G_D}}{M_0} \right) = -\gamma^2 [a_1 G_D^2 (1 + (1 + \xi)^2) + 2a_2 G_D G_0 + 2a_3 G_0^2] D, \quad (2.17)$$

Vykonáme druhé meranie pre hodnoty $2G_D$ a $-2G_D$ a sčítame výsledky

$$\ln \left(\frac{M_{G_D}}{M_0} \right) + \ln \left(\frac{M_{-G_D}}{M_0} \right) = -\gamma^2 [4a_1 G_D^2 (1 + (1 + \xi)^2) + a_2 G_D G_0 + 2a_3 G_0^2] D. \quad (2.18)$$

Potom rozdiel súm (2.17) a (2.18) získame výpočtom, ktorý závisí len na parametroch časových intervaloch a difúzneho gradientu. Účinky oboch G_0 gradientov a krížové termy sú potláčané. Tento postup je popísaný pomocou nasledujúcej rovnice

$$\begin{aligned} & \ln\left(\frac{M_{2G_D}}{M_0}\right) + \ln\left(\frac{M_{-2G_D}}{M_0}\right) - \ln\left(\frac{M_{G_D}}{M_0}\right) - \ln\left(\frac{M_{-G_D}}{M_0}\right) \\ &= -6\gamma^2 \left[a_1 G_D^2 + a_1 G_D^2 \xi + \frac{a_2}{6} G_D G_0^2 \xi \right] D. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Toto usporiadanie pre $\xi = 0$ odstráni krížové podmienky, a b -faktor, bude závisieť od zvolených časových intervalov, od presnosti určenia veľkosti signálu MR a δ_M od gradientov G_D . Posledná rovnica môže byť použitá na výpočet difúzneho koeficientu podľa vzťahu

$$D = \frac{\ln\left(\frac{M_{2G_D} M_{-2G_D}}{M_{G_D} M_{-G_D}}\right)}{-6\gamma^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3}\right) G_D^2}. \quad (2.20)$$

Pre štyri merania (2.19), chyba b -faktoru je daná súčtom relatívnych chýb $a_1 G_D^2 \xi$, ktorá nezávisí na gradientu G_0 (je to rovnaké ako v metóde troch meraní) a chýb $(a_2 / 6) G_D G_0^2 \xi$. Pre štyri merania, táto chyba je tretinová, ako pri metóde pre tri merania (2.16). Relatívna chyba merania difúzneho koeficientu pre štandardnú spin-echo sekvenciu, za predpokladu, že nesie chybu vzniká iba z hodnoty NMR a je

$$D = \frac{4\delta_M}{\ln\left(\frac{M_{2G_D} M_{-2G_D}}{M_{G_D} M_{-G_D}}\right)}. \quad (2.21)$$

Chyba δ_M závisí na veľkosti pomeru signal-šum MR signálu alebo od MR obrazu [8].

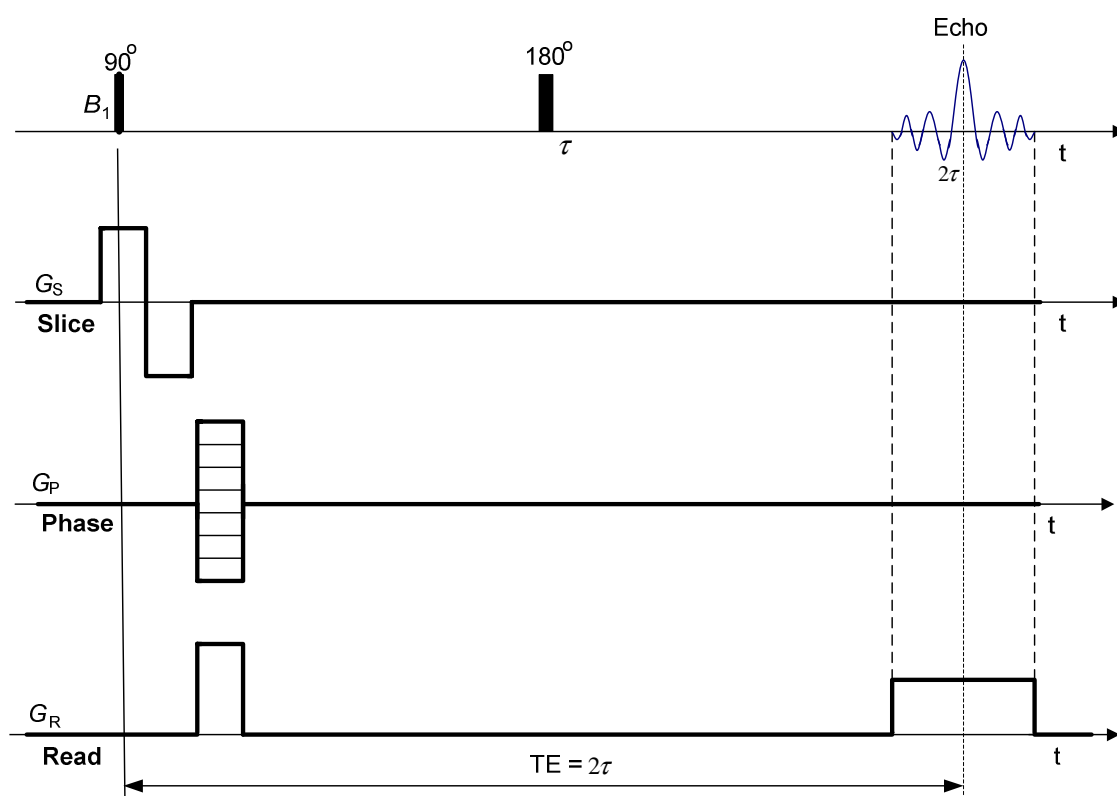
3. Impulzná sekvencia MR zobrazovania

Originálna Stejskal-Tanner zobrazovacia MR sekvencia [1] difúzne viazaného spinového echa je znázornená na (obr.2) označuje sa aj ako DWSE (Diffusion-Weighted Spin Echo). Pretože dva difúzne gradienty sú symetrické (rovnaké dĺžky, rozkmity a pozície vzhľadom na RF impulzy) a oddelené 180° impulzom, všetky rozfázované spiny (rotácie) spôsobené prvým gradientom, budú sfázované druhým difúzne citlivým gradientom. Pohybujúce sa spiny (následkom toku a difúzie) nerofokuju a stenšia signál a vzniká echo [9].

G je veľkosť difúzne citlivého impulzu gradientu, ktorý môže byť aplikovaný v smere osi x , y , z vodivého magnetu. Z sekvencie difúzne viazaného spinového echa vidíme ako je echo signál snímaný pomocou G_S (select direction) následne prebieha kódovanie fáze G_P (phase-encode direction) v treťom bode kódovanie frekvencie G_R (readout direction) počas času TE (time echo). Treba poznamenať, že v praxi je možné zameniť smer frekvenčného a fázového kódovania [10], [11], [12].

Táto sekvencia sa využíva pri spektroskopii.

Na obr. 3 je zobrazovacia sekvencia difúzne viazaného spinového echa v ktorej uvažujeme vplyv statického gradientu G_0 a difúzne gradienty G_D na echo. Tieto difúzne gradienty by nemali mať vplyv na echo nemali by ho posúvať.



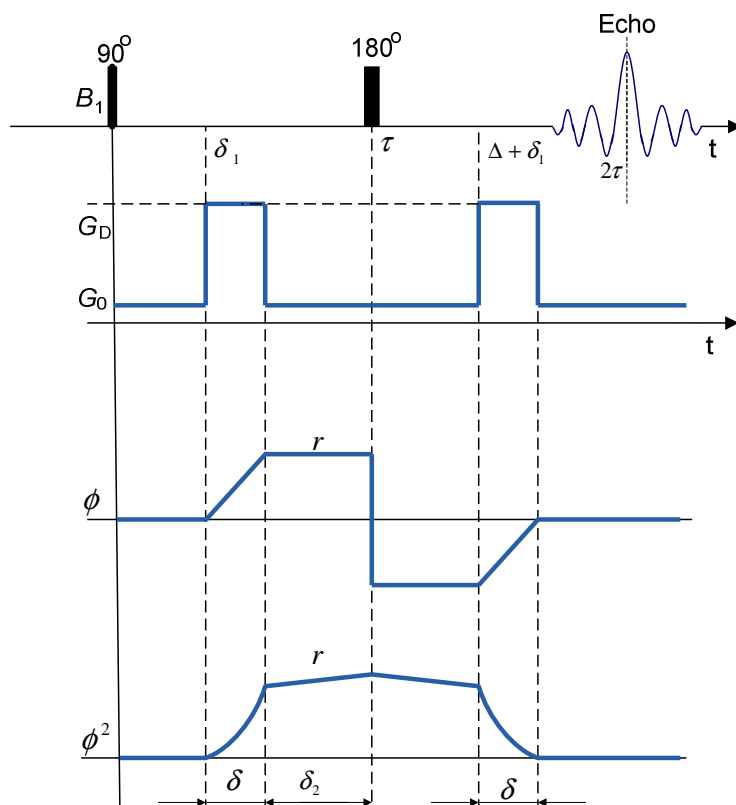
Obrázok. 2 Stejskal-Tanner zobrazovacia sekvencia difúzne viazaného spinového echa



4. Stanovenie chýb difúzných koeficientov – experimentálna časť

4.1.) PFGSE NMR sekvencia - obdĺžnikové gradienty

Skúmam chyby difúzných koeficientov za použitia obdĺžnikových gradientov a to pomocou najbežnejšej metódy na meranie a to PFGSE NMR sekvencie znázornenej na obr.4. Behom sekvencie spinového-echa sú aplikované dva gradienty v našom prípade obdĺžnikového tvaru. Z obrázku možno vidieť, že dĺžka gradientov je δ a časový interval medzi počiatkami gradientných impulzov je Δ .



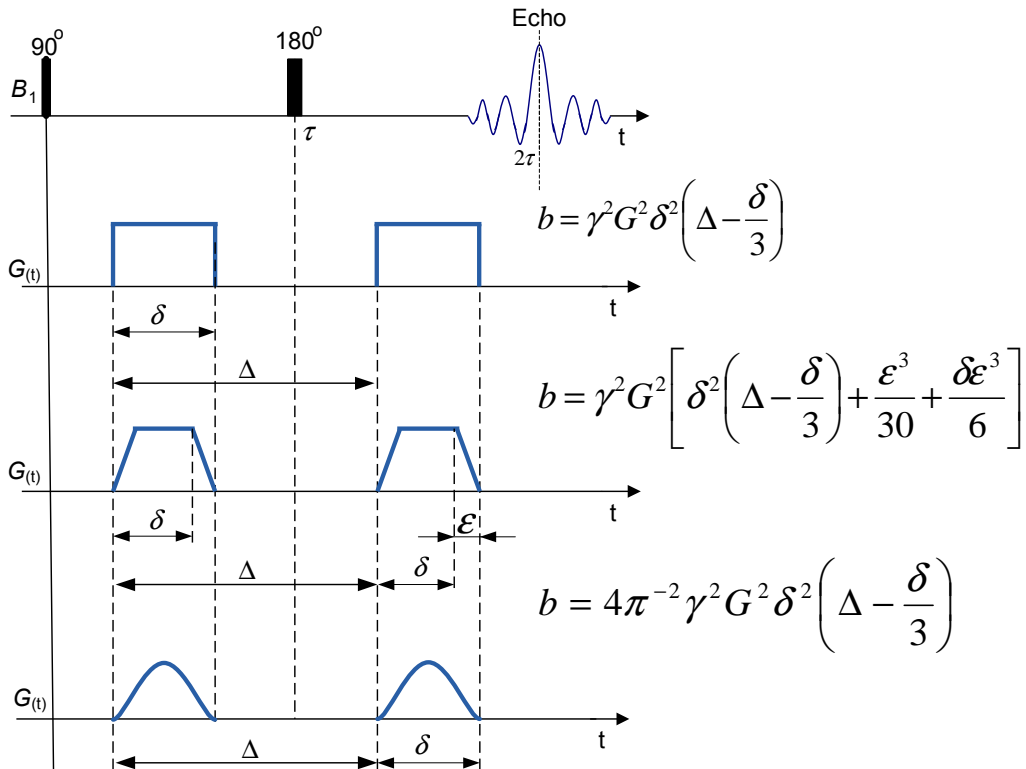
Obrázok. 4 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými priebehmi

Výpočet b -faktoru je možné spraviť pomocou vzťahu. Z neho platí že:

$$\begin{aligned}
b &= -\gamma^2 \left\{ \int_0^{T_E} [\Phi + (\xi - 1)f]^2 dt \right\} = -\gamma^2 \left\{ \int_0^{T_E/2} \Phi^2 dt + \int_{T_E/2}^{T_E} (\Phi - 2f)^2 dt \right\} = \\
&= -\gamma^2 \left\{ \int_0^{\delta} G^2 t^2 dt + \int_{T_E/2}^{T_E} [-G\delta + G(t - \Delta)]^2 dt \right\} = -\gamma^2 \left\{ \int_0^{\delta} G^2 t^2 dt + \int_0^{\delta} [G(s) - G\delta]^2 ds \right\} = \\
&= -\gamma^2 \left\{ \int_0^{\delta} G^2 t^2 dt + \int_0^{\Delta - \delta_1} (G\delta)^2 dt + \int_{\Delta - \delta_1}^{\Delta} (-G\delta)^2 dt + \int_0^{\delta} [G(s) - G\delta]^2 ds \right\} = \\
&= -\gamma^2 \left\{ \frac{G^2 (\delta)^3}{3} + G^2 \delta^2 \Delta - G^2 \delta^3 + \frac{G^2 (\delta)^3}{3} \right\}, \\
b &= -\gamma^2 G^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) \\
\text{pre } s &= (t - \Delta).
\end{aligned}$$

(4.1)

Difúzne gradienty G_D nemusia mať obdĺžnikový tvar. V niektorých prípadoch sa môže použiť lichobežníkový tvar alebo gradienty s pol-sinusovým priebehom, ako vidieť na (obr.5) kde sú uvedené aj vzťahy pre výpočet b -faktorov.



Obrázok. 5 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými, lichobežníkovými a polo-sínusovými priebehmi a vzťahy pre výpočet b -faktorov

Keď to nie je zobrazovací systém pridáva sa prvý a druhý gradient a ten mení fázu každého miesta toho vzorku. Jedno miesto značí r a je to bod priestoru $r \in x, y, z$

Fáza je elektrotechnike definovaná

$$\phi_r = \omega t,$$

Omega v magnetickej rezonancii je

$$\omega = \gamma.B \text{ a } \gamma.B \text{ vyjadruje kmitočet jadier,}$$

dosadením do prvého vzťahu dostávame

$$\phi_r = \gamma.B.t,$$

$$\phi = \gamma.G.r.t \text{ indukcie magnetického poľa } B \text{ je } G.r,$$

$$b = \int \phi^2 dt$$

Chyby b -faktoru a difúzneho koeficientu vyhodnocujem pomocou nasledovného programu v Matlabe

% výpočet b-faktoru pre 6-intervalovú sekvenciu a porovnanie s klasickým výpočtom.

clear

[filenameplus,pathname] = uigetfile('*.asc', 'Data merania');

fname=[pathname,filenameplus];

dat =load(fname);

```
delta = dat(1,1);           % dĺžka gradientu difúzne citlivého
delta1 = dat(2,1);          % dĺžka od 90° impulzu k počiatku gradientu
delta2 = dat(3,1);          % dĺžka od konca gradientu do 180° impulzu
DELTA = dat(4,1);           % čas medzi pi/2 impulzami
gama = dat(5,1);            % gyromagnetický pomer
Gp = dat(6,1);              % veľkosť gradientu GP    1 - 180mT/m
Gr = dat(7,1);              % veľkosť gradientu FP    1 - 180mT/m
Fp = dat(8,1);              % veľkosť gradientu GP    1 - 180mT/m
Fr = dat(9,1);              % veľkosť gradientu FP    1 - 180mT/m
G0 = dat(10,1);             % veľkosť gradientu g    1 - 180mT/m
F0 = dat(11,1);             % veľkosť gradientu g    1 - 180mT/m
M0 = dat(12,1);             % veľkosť echa bez gradientov
ME = dat(13,1);             % veľkosť echa s gradientami
```

MM = ME/M0;

G=[G0 Gp+G0 G0 G0 Gr+G0];

G2=[G0 Gr+G0 G0];

r1 = delta1+delta; r2 = r1+delta2; r3=r2+delta1; r4=r3+delta;

r5=r4+delta2;

ti1= [delta1 r1 r2];

ti2= [r3 r4 r5];

Dt = 1e-6;

% Vytvorí graf gradientov Grad=f(t) podľa zadania

cas1 = (1:max(ti1)/Dt)-1;

t1 = cas1*Dt;

j = 1;

for l = 1:max(ti1)/Dt

k=ti1(j)/Dt; g=G(j);

if l < k ,

Grad(l) = g;

else

j = j + 1;

```

    end
end

cas2 = (max(ti1)/Dt:max(ti2)/Dt-1);
t2 = cas2*Dt;
j = 1;
for l = 1:max(ti2)/Dt-max(t1)/Dt
    k=ti2(j)/Dt-max(t1)/Dt; g=G2(j);
    if l < k ,
        Grad2(l) = g;
    else
        j = j + 1;
    end
end

% Výpočet štvorca integrálu do 180° impulzu

I = 0;
for l = 1:max(ti1)/Dt-1
    I = I + Grad(l)*Dt;
    II(l)= I^2;
    IP(l)= I;
end
IF = I; % hodnota fázy tesne pred 180° impulzom
% Výpočet integrálu štvorca integrálu do 180° impulzu

I = 0;
for l = 1:max(ti1)/Dt-1
    I = I + II(l)*Dt;
    AP(l) = I;
    b = I;
end

% Výpočet štvorca integrálu od 180° impulzu do echa

I2 = -IF; % počiatočná hodnota je záporne vzatá hodnota fázy pred 180°
impulzom
for l = 1:max(ti2)/Dt-max(t1)/Dt %+Dt/2
    I2 = I2 + Grad2(l)*Dt;
    II2(l)= I2^2;
    IP2(l)= I2;
end

% Výpočet integrálu štvorca integrálu od 180° impulzu do echa

I2 = 0;
for l = 1:max(ti2)/Dt-max(t1)/Dt
    I2 = I2 + II2(l)*Dt;
    AP2(l) = I2;
    b2 = I2;
end

bvypocet=gama^2*(b+b2)
DELTak = delta + delta1 + delta2;
bklasicka = gama^2.*(delta.^2 .* Gp.^2 .* (DELTak - delta./3))
Dvypocet = -log(MM)/bvypocet
Dklasicka = -log(MM)/ bklasicka
RCHB=((bvypocet-bklasicka)/bklasicka)*100

```

```
RCHD=((Dvypocet-Dklasicka)/Dklasicka)*100
```

```
figure(1)
plot([t1 t2],[IP IP2 ])
xlabel('t [s]')
ylabel(' b [s/m^2]')
```

```
figure(2)
plot([t1 t2],[II II2 ])
xlabel('t [s]')
ylabel(' b [s/m^2]')
```

```
figure(3)
plot([t1 t2],[AP AP2+max(AP)].*gama^2)
xlabel('t [s]')
ylabel(' b [s/m^2]')
```

V experimente pracujem so vzorkami vody. Pomocou hore uvedeného programu počítam *b*-faktor a difúzny koeficient a to dvomi spôsobmi. Prvý vychádza z teoretických vzťahov a hlavne zo vzťahu 4.1. Druhý vychádza z numerického výpočtu priebehu gradientu programom. Z týchto hodnôt určujem relatívne chyby medzi jednotlivými výsledkami. Tento program je vhodný pre simuláciu vplyvu zmien parametrov merania difúzných koeficientov a je možné simulovať napr. zmeny len jedného gradientu prípadne dobehu gradientných impulzov.

V prvom bode experiment spočíva v tom, že zvyšujem a znižujem veľkosti hodnôt gradientov G_p a G_R o 1%. Vyhodnocujem tieto prípady

4.1.1a.) základné parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie.

4.1.1b.) gradienty G_p a G_R a zvyšujem o 1%.

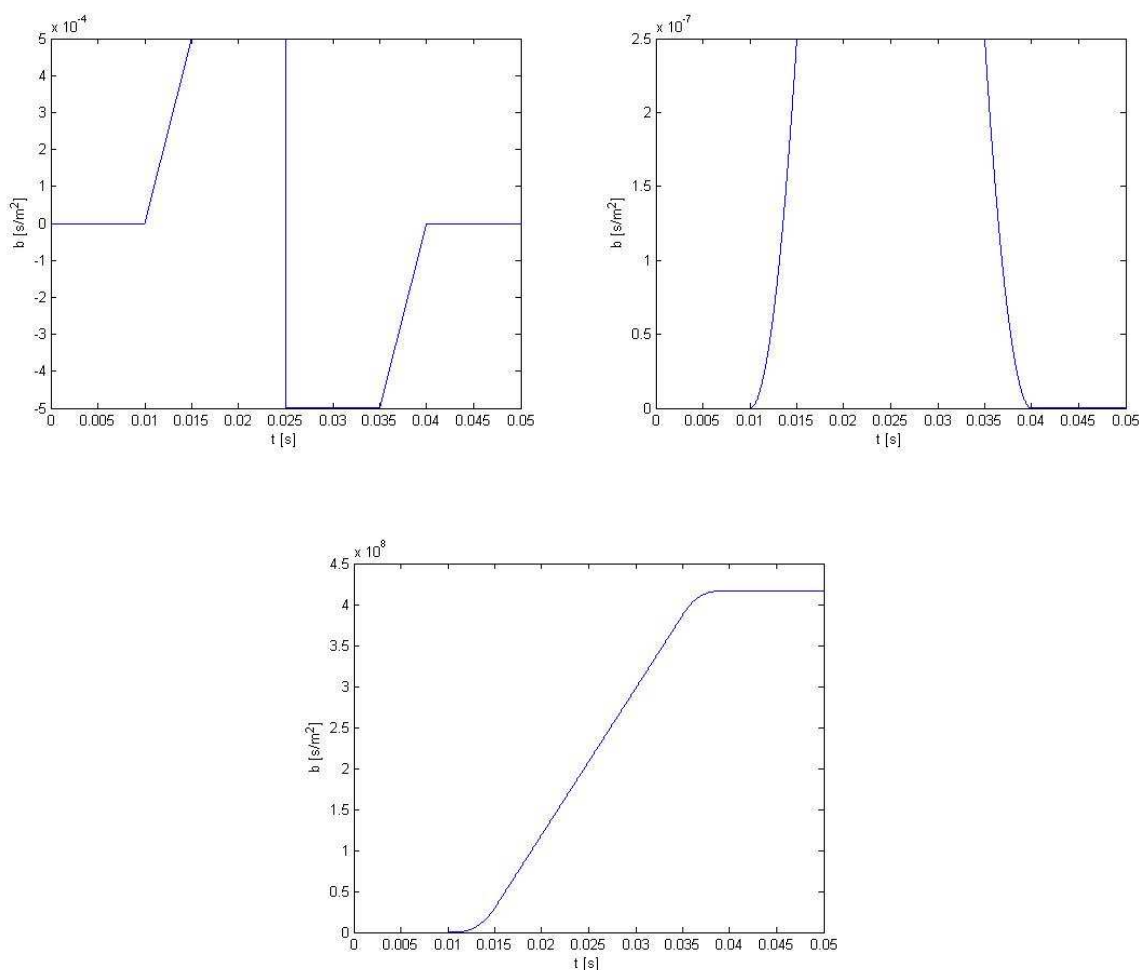
4.1.1c.) gradienty G_p a G_R a znižujem o 1%.

4.1.1a.) Základné parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie pre vzorku vody

Toto sú základné parametre z ktorých vychádzam v experimente. Vychádzajú zo vzoriek vody.

$5 \cdot 10^{-3}$	delta(δ) - dĺžka gradientu difúzne citlivého,	
10^{-2}	delta ₁ (δ_1) - dĺžka od 90° impulzu k počiatku gradientu,	
10^{-2}	delta ₂ (δ_2) - dĺžka od konce gradientu do 180° impulzu,	
$2.674 \cdot 10^8$	gamma (γ) - gyromagnetický pomer,	
$100 \cdot 10^{-3}$	G_p - relatívna hodnota gradientu	1 – 180 mT/m,
$100 \cdot 10^{-3}$	G_R - relatívna hodnota gradientu	1 – 180 mT/m,
0	G_0 - relatívna hodnota gradientu	1 – 180 mT/m,
30000	M_0 - hodnota echa bez gradientov,	
11500	M_E - hodnota a echa s gradientami.	

Výsledky sekvencie merania PFGSE NMR po dosadení základných parametrov do programu sú na (obr.6). Ako vidno tak sa podobajú teoretickým predpokladom, ktoré sú znázornené na (obr.4). Z dôvodu, že výsledky jednotlivých sekvencií t.j (obr.7-20) po menení G_p , G_R , δ pridaní G_0 sú viac menej rovnaké tak som ich uvádzal v menšej veľkosti.



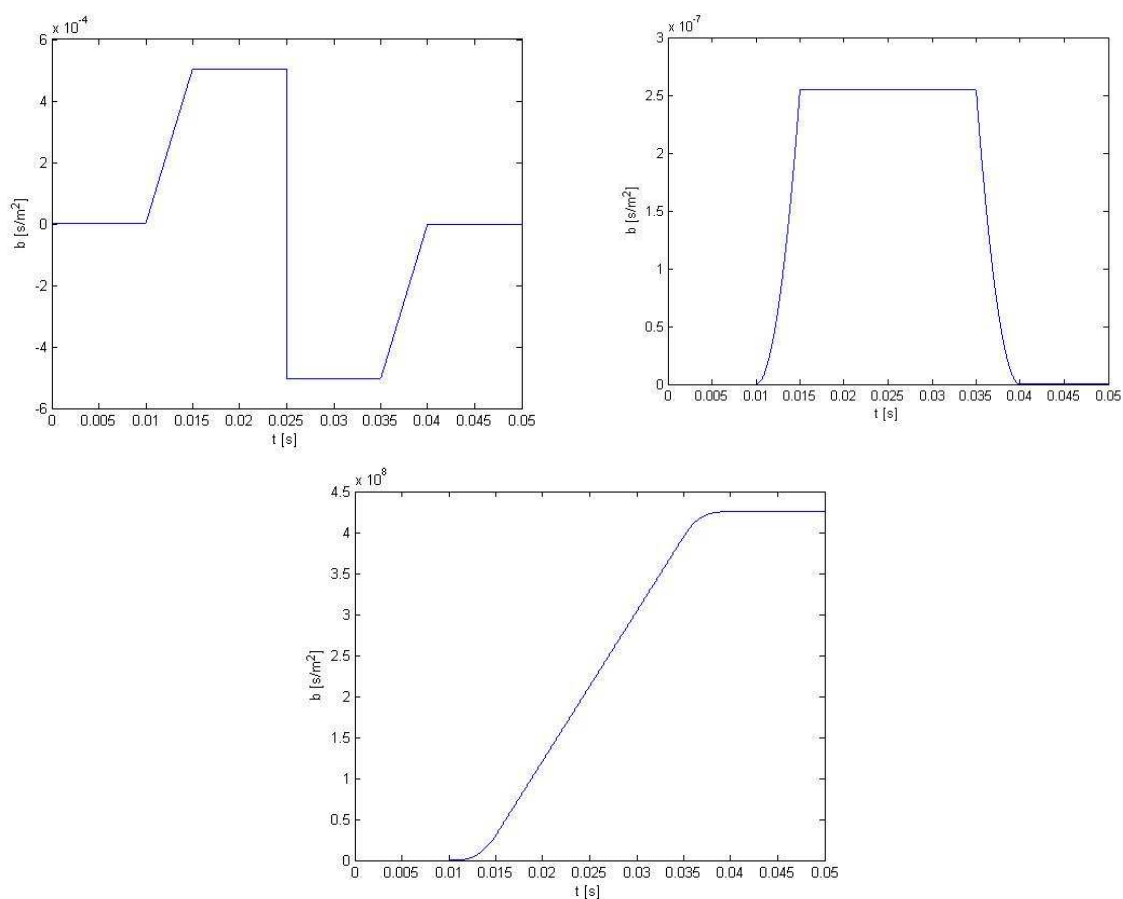
Obrázok. 6 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania (základné parametre)

4.1.1b.) Gradienty G_P a G_R a zvyšujem o 1%

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.1a.) vyznačené sú len zmenené hodnoty gradientov G_P a G_R a zvyšujem ich o 1%.

$101 \cdot 10^{-3}$ G_P - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m,

$101 \cdot 10^{-3}$ G_R - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok. 7 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_P = 101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 101 \cdot 10^{-3}$)

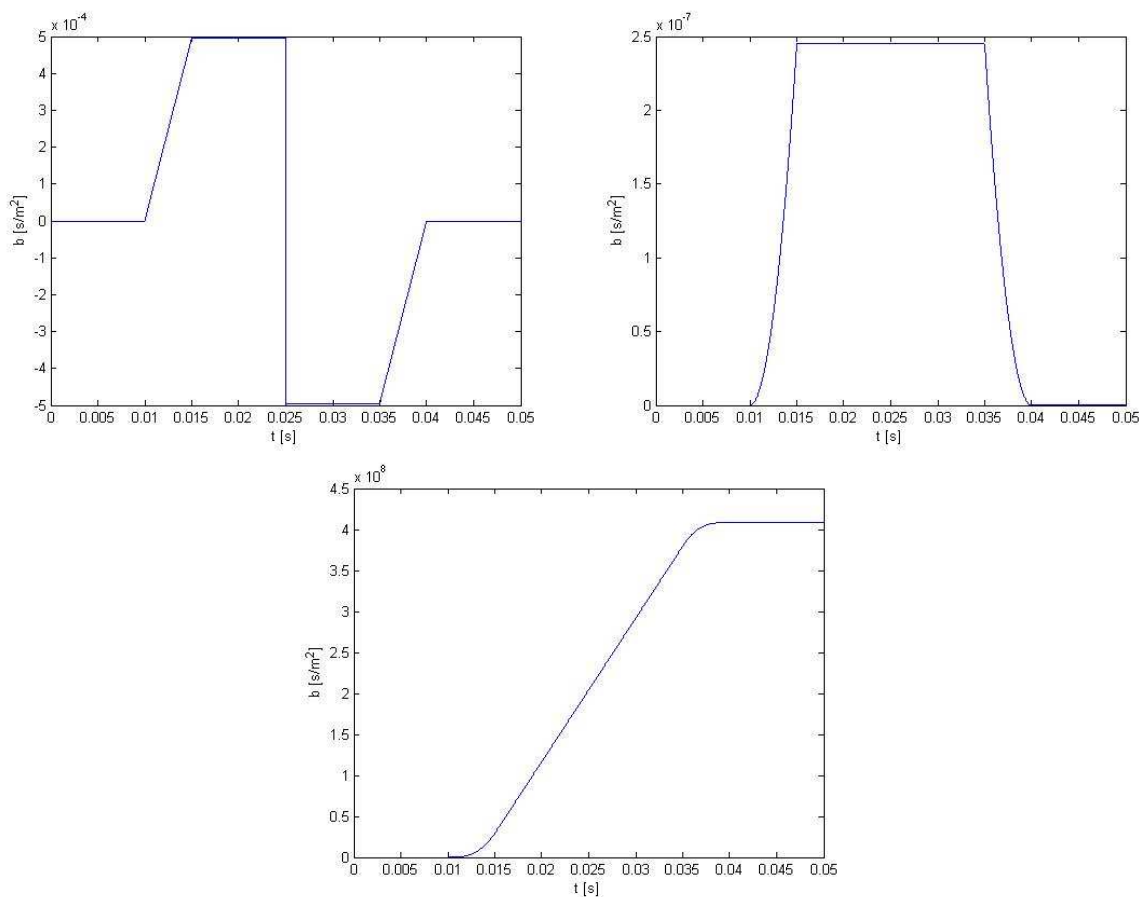
Relatívna chyba difúzneho koeficientu bola v tomto prípade bola 0,0343 % a relatívna chyba b -faktoru -0,0343 % z toho vyplýva, pri zväčšení alebo zmenšení oboch gradientov o 1% relatívne chyby sú rovnaké ako chyby základných parametrov pre vzorky vody PFG NMR sekvencie. Výsledné relatívne chyby sú uvedené v tabuľke 1.

4.1.1c.) Gradienty G_P a G_R a znižujem o 1%

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.1a.) vyznačené sú len zmenené hodnoty gradientov G_P a G_R a znižujem ich o 1%.

$99 \cdot 10^{-3}$ G_P - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m,

$99 \cdot 10^{-3}$ G_R - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok. 8 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_P = 99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 99 \cdot 10^{-3}$)

V druhom bode experiment spočíva v tom, že zvyšujem a znižujem veľkosť gradientu G_P o 1% a G_R ostáva konštantné a naopak.

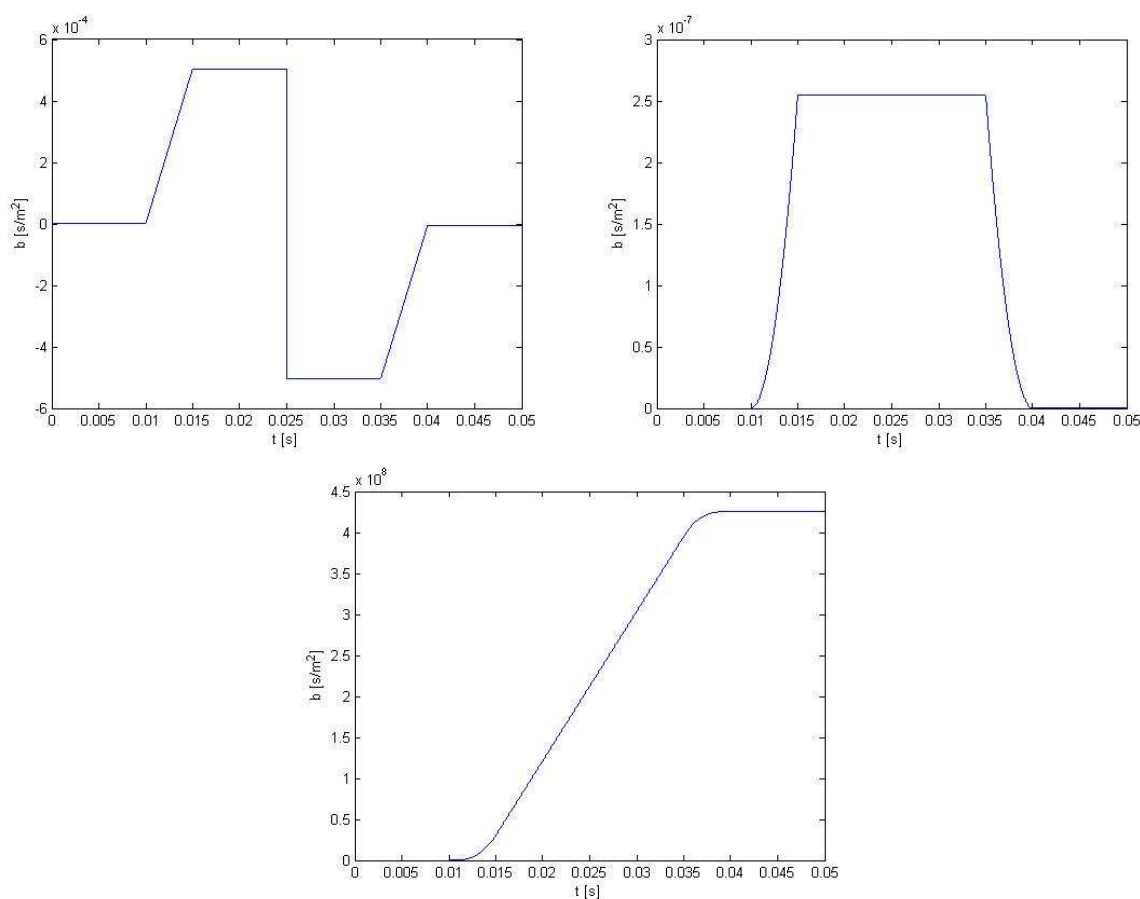
Vyhodnocujem tieto prípady:

- | | | |
|-------------------------------|------|----------------------------------|
| 4.1.2a.) G_P zvyšujem | o 1% | $G_R = \text{konst}$, |
| 4.1.2b.) G_P znižujem | o 1% | $G_R = \text{konst}$, |
| 4.1.2c.) $G_P = \text{konst}$ | | $G_R = \text{zvyšujem o } 1\%$, |
| 4.1.2d.) $G_P = \text{konst}$ | | $G_R = \text{znižujem o } 1\%$. |

4.1.2a.) G_P zvyšujem o 1% $G_R = \text{konst}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.1a.) vyznačená je len zmenená hodnota G_P , ktorú zvyšujem o 1% a $G_R = \text{konst}$.

$101 \cdot 10^{-3}$ G_P - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok. 9 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_P = 101 \cdot 10^{-3}$)

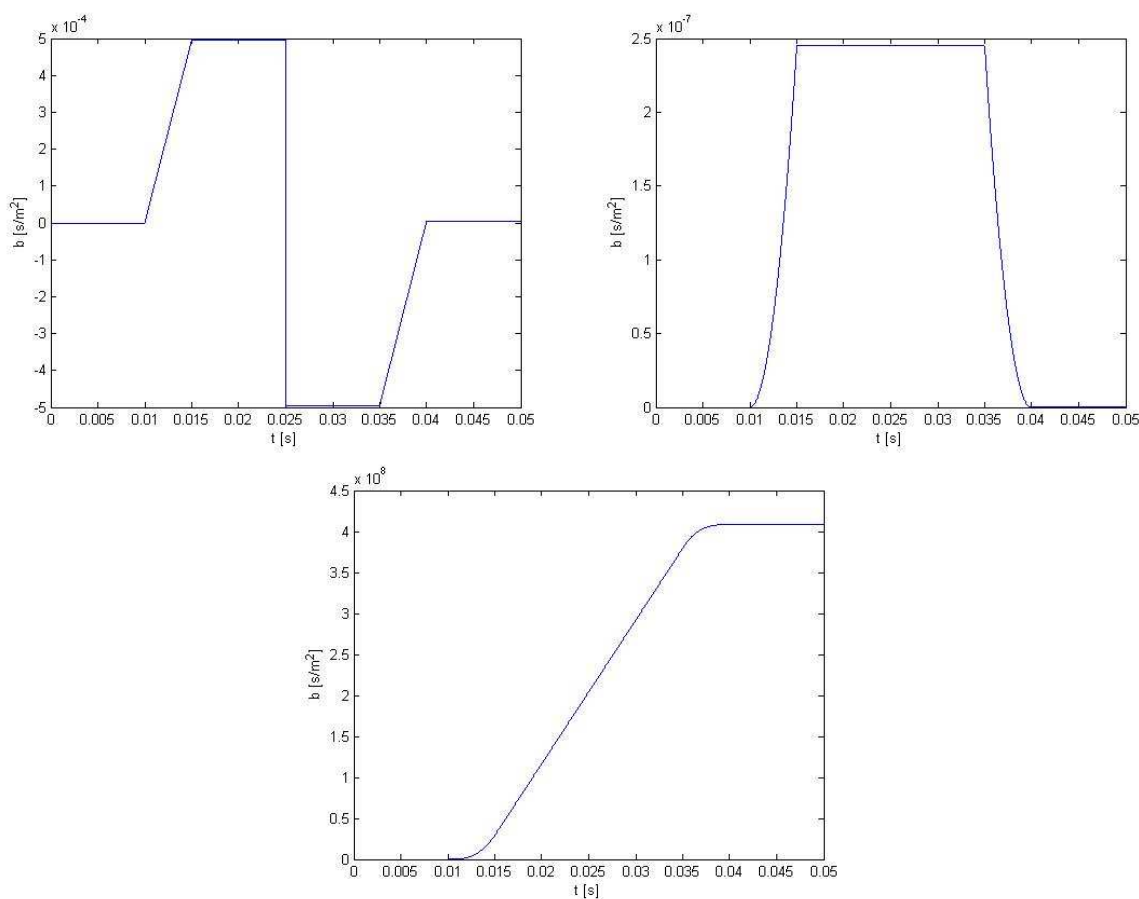
Relatívna chyba difúzneho koeficientu pri zväčšení prvého gradientu G_P o 1% bola v tomto prípade 0,0415 % a relatívna chyba b -faktoru -0,0414 .

Vplyv jedno percentného zvýšenia prvého gradientu sa prejavil približne 2% zvýšením chybovosti s porovnaním relatívnych chýb základných parametrov pre vzorky vody PFG NMR sekvencie.

4.1.2b.) G_P znižujem o 1% $G_R = \text{konst}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.1a.) vyznačená je len zmenená hodnota G_P , ktorú znižujem o 1% a $G_R = \text{konst}$.

$99 \cdot 10^{-3} G_P$ - relatívna amplitúda gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok. 10 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_P = 99 \cdot 10^{-3}$)

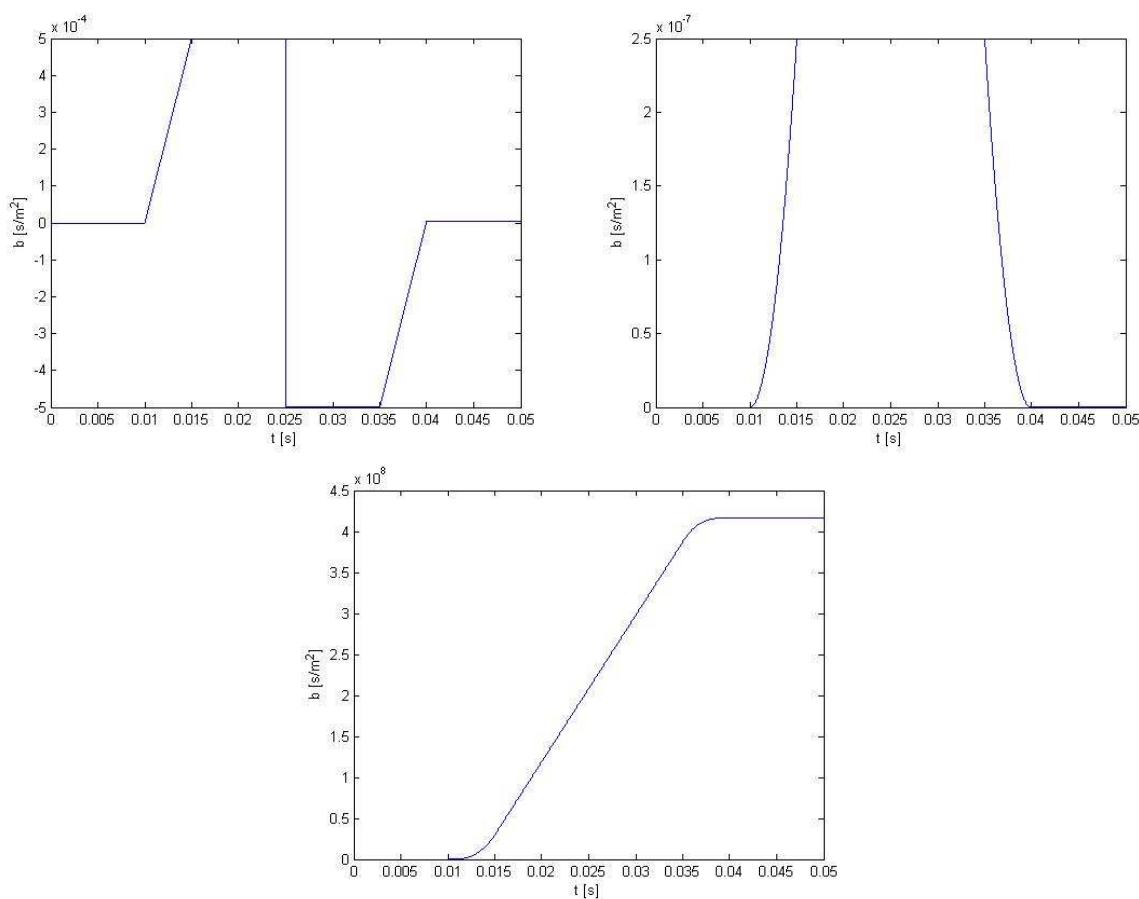
Relatívna chyba difúzneho koeficientu pri znížení prvého gradientu G_P o 1% bola v tomto prípade -0,1015 % a relatívna chyba b -faktoru 0,1016%.

Vplyv jedno percentného zníženia prvého gradientu sa prejavil približne 3krát väčšími relatívnymi chybami s porovnaním relatívnych chýb základných parametrov pre vzorky vody PFG NMR sekvencie.

4.1.2c.) $G_P = \text{konst}$ $G_R = \text{zvyšujem o 1\%}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota G_R , ktorú zvyšujem o 1% a $G_P = \text{konst}$.

$101 \cdot 10^{-3}$ G_R - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok.11 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_R = 101 \cdot 10^{-3}$)

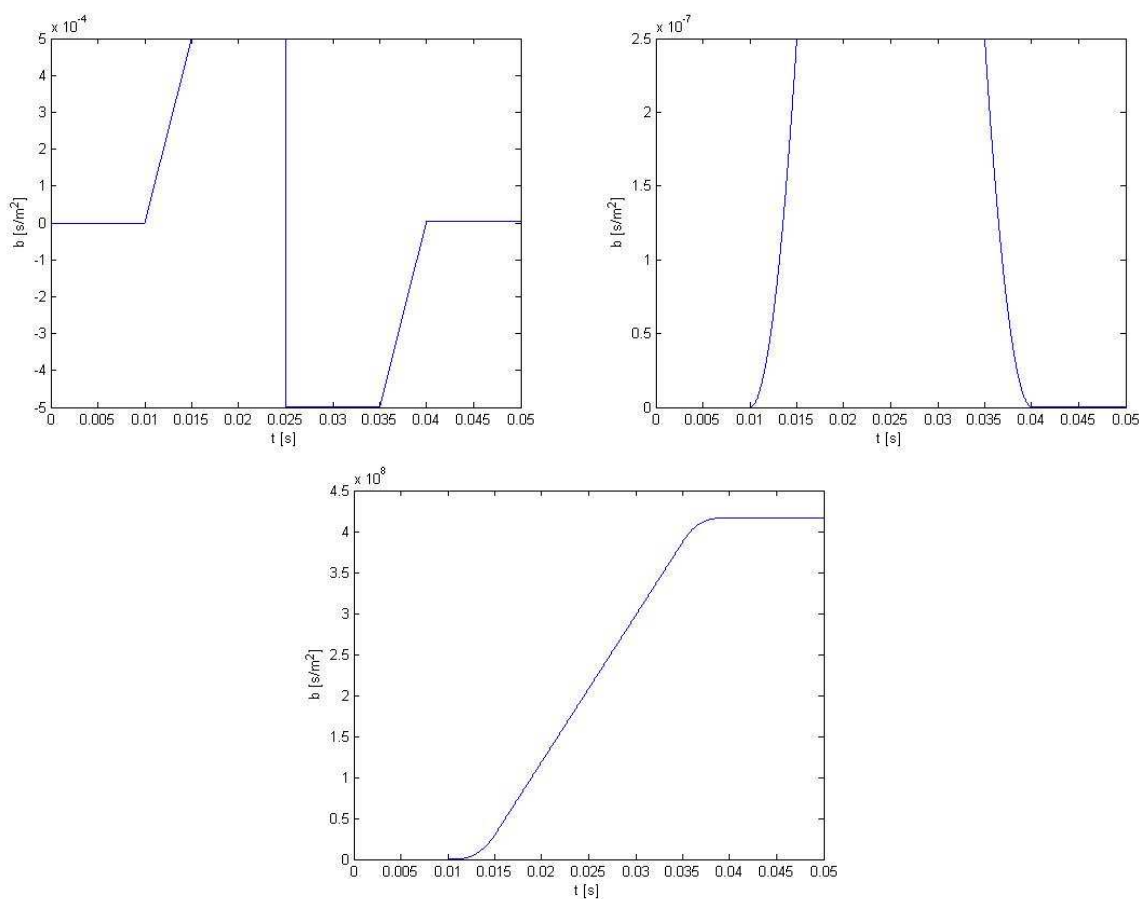
Relatívna chyba difúzneho koeficientu pri zväčšení prvého gradientu G_R o 1% bola v tomto prípade -0,1008 % a relatívna chyba b -faktoru 0,1008%.

Tieto hodnoty boli približne rovnaké ako v predchádzajúcom prípade.

4.1.2d.) $G_P = \text{konst}$ $G_R = \text{znižujem o 1\%}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota G_R , ktorú znižujem o 1% a $G_P = \text{konst}$.

$99 \cdot 10^{-3} G_R$ - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok. 12 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_R = 99 \cdot 10^{-3}$)

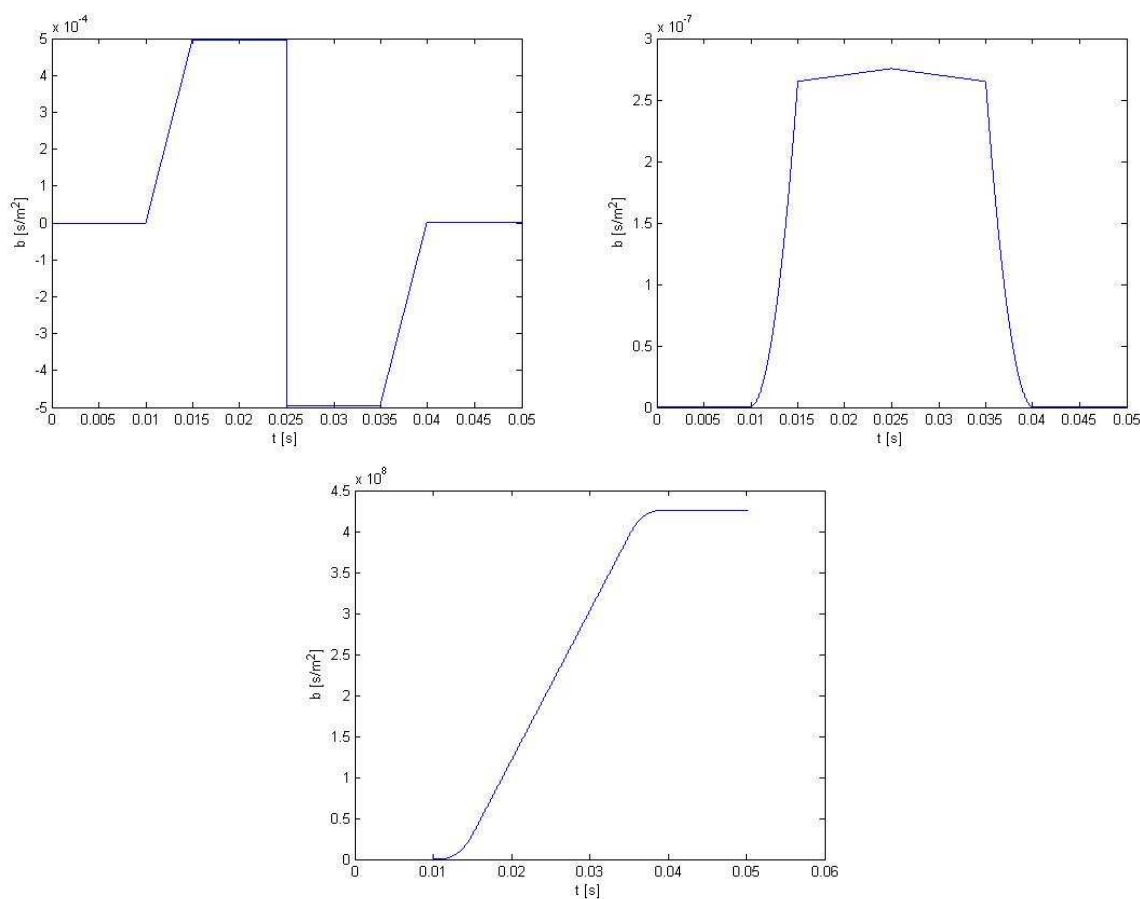
V treťom bode experiment spočíva v tom, že zvyšujem a znižujem dĺžku difúzne citlivého gradientu delta o 1%. Vyhodnocujem tieto prípady:

- 4.1.3a.) δ znižujem o 1%,
- 4.1.3b.) δ zvyšujem o 1%.

4.1.3a.) δ znižujem o 1%

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota δ znižujem o 1%.

$4.95 \cdot 10^{-3}$ δ - dĺžka gradientu.



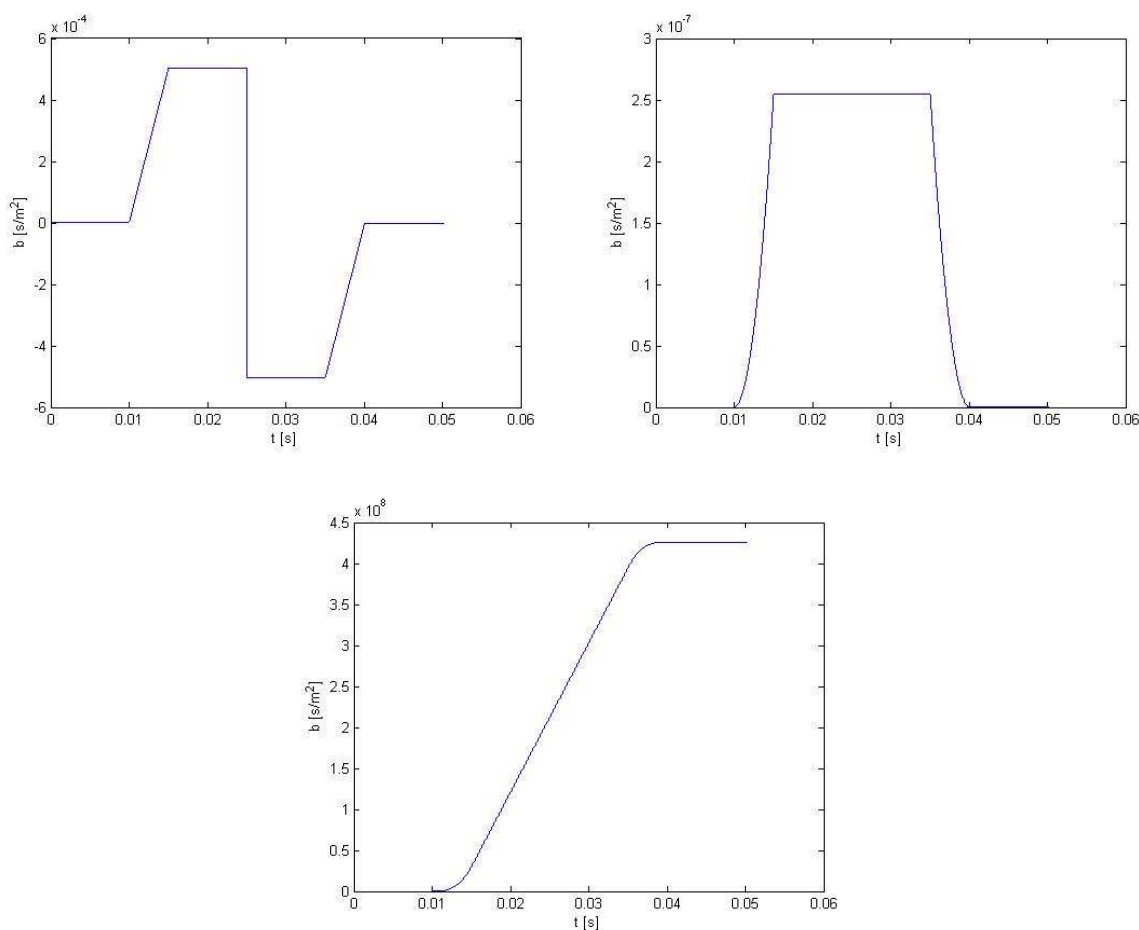
Obrázok. 13 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($\delta = 4.95 \cdot 10^{-3}$)

Pri znížení dĺžky gradientu δ o 1% výsledné relatívna chyba b -faktoru bola $2.89 \cdot 10^{-7}\%$ a difúzneho koeficientu bola $-2.89 \cdot 10^{-7}\%$ z čoho vyplýva že to nemá podstatný relatívne chyby.

4.1.3a.) δ zvyšujem o 1%

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota δ zvyšujem o 1%.

$5.05 \cdot 10^{-3}$ δ - dĺžka gradientu.



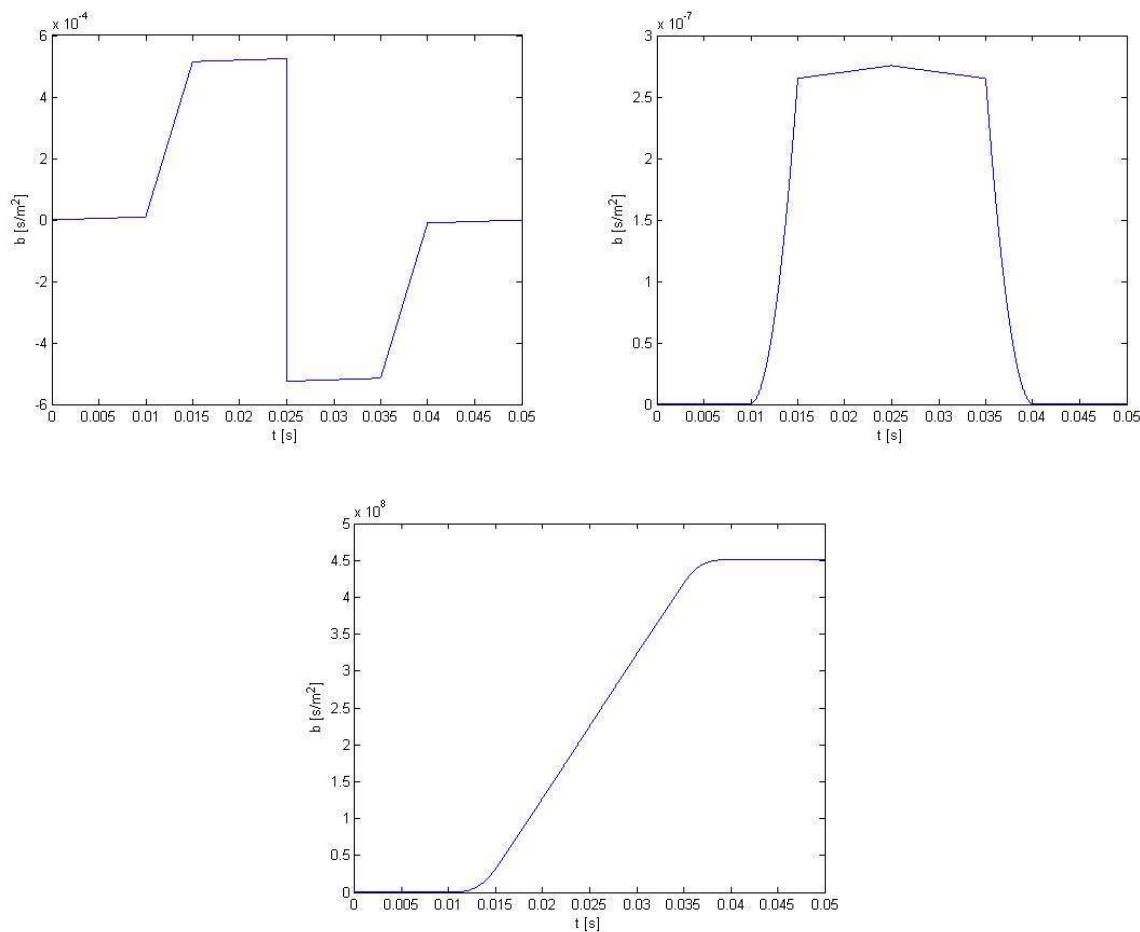
Obrázok. 14 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($\delta = 5.05 \cdot 10^{-3}$)

V štvrtom bode experiment spočíva v tom, že pridám statický gradient g_0 Vyhodnocujem štyri prípady:

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 4.1.4a.) Statický gradient | $G_0 = 10^{-3}$, |
| 4.1.4b.) Statický gradient | $G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$, |
| 4.1.4c.) Statický gradient | $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$, |
| 4.1.4d.) Statický gradient | $G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$. |

4.1.4a.) Statický gradient $G_0 = 10^{-3}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota $G_0 = 10^{-3}$.

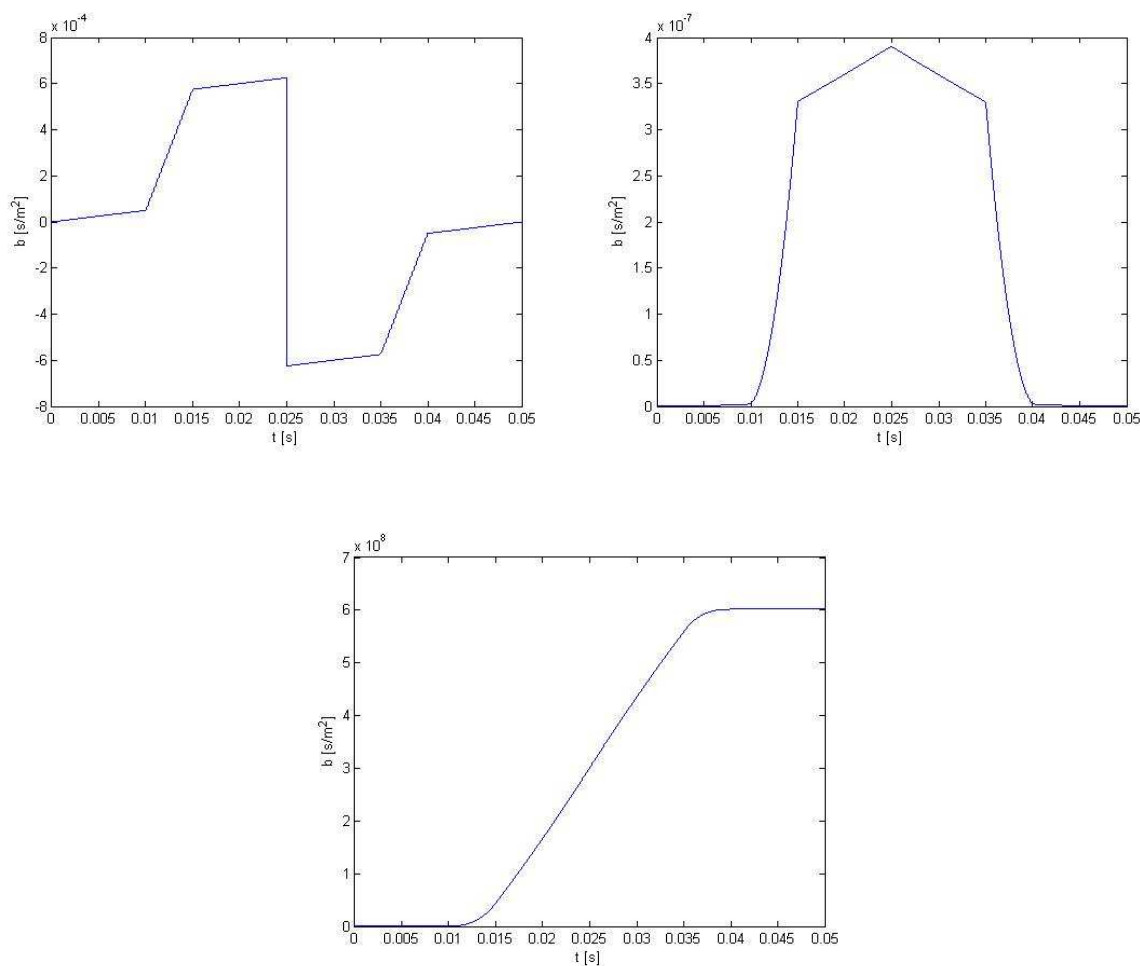


Obrázok. 15 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 10^{-3}$)

Po pridaní statického gradientu 10^{-3} boli relatívne chyby najvyššie z doterajších prípadov. Relatívna chyba b -faktoru bola 8,1419% a difúzneho koeficientu -7,529%. To je potvrdením teoretických poznatkov uvedených v prvej časti diplomovej práce.

4.1.4b.) Statický gradient $G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota $G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$.

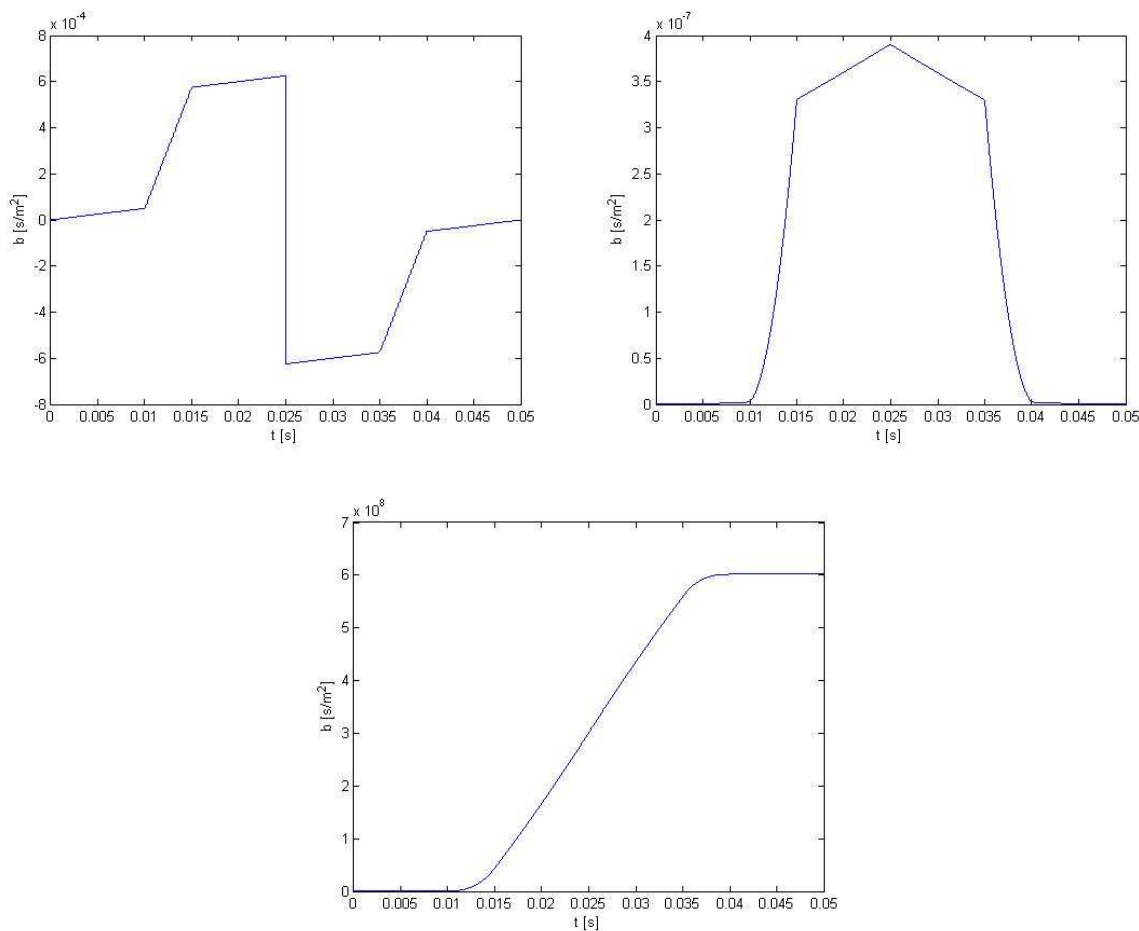


Obrázok. 16 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$)

Po pridaní statického gradientu $3 \cdot 10^{-3}$ bola relatívne relatívna chyba b -faktoru bola 16,6747% a difúzneho koeficientu -14,2938%. Pri trojnásobnom zvýšení statického gradientu sa relatívne chyby zvýšili približne dvakrát.

4.1.4c.) Statický gradient $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$.

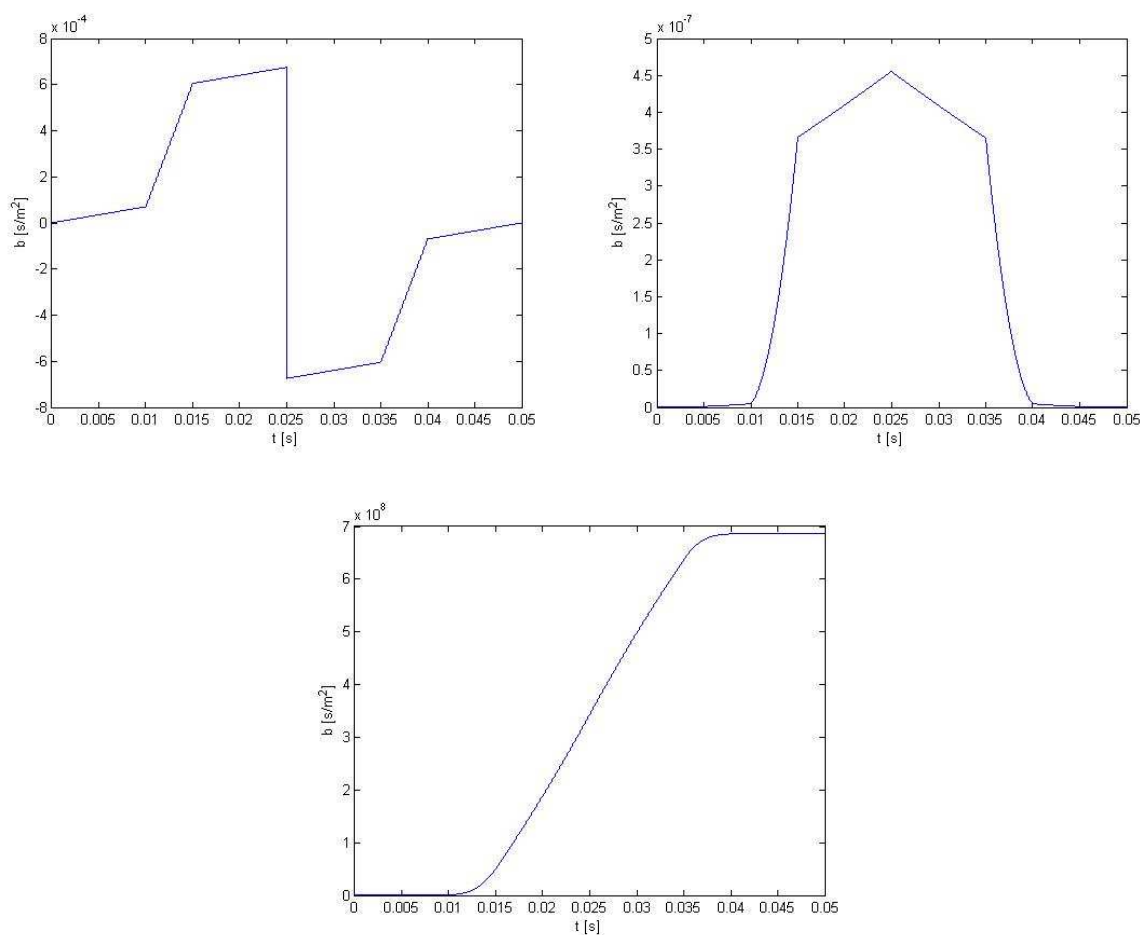


Obrázok. 17 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$)

Po pridání statického gradientu $5 \cdot 10^{-3}$ bola relatívne relatívna chyba b -faktoru bola 44,4162% a difúzneho koeficientu -30,7582%. Pri päťnásobnom zvýšení statického gradientu sa relatívne chyby zvýšili približne päťkrát.

4.1.4d.) Statický gradient $G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.2a.) vyznačená je len zmenená hodnota $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$.



Obrázok. 18 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$)

Po pridání statického gradientu $7 \cdot 10^{-3}$ bola relatívne relatívna chyba b -faktoru bola 64,6967% a difúzneho koeficientu -39,2804%.

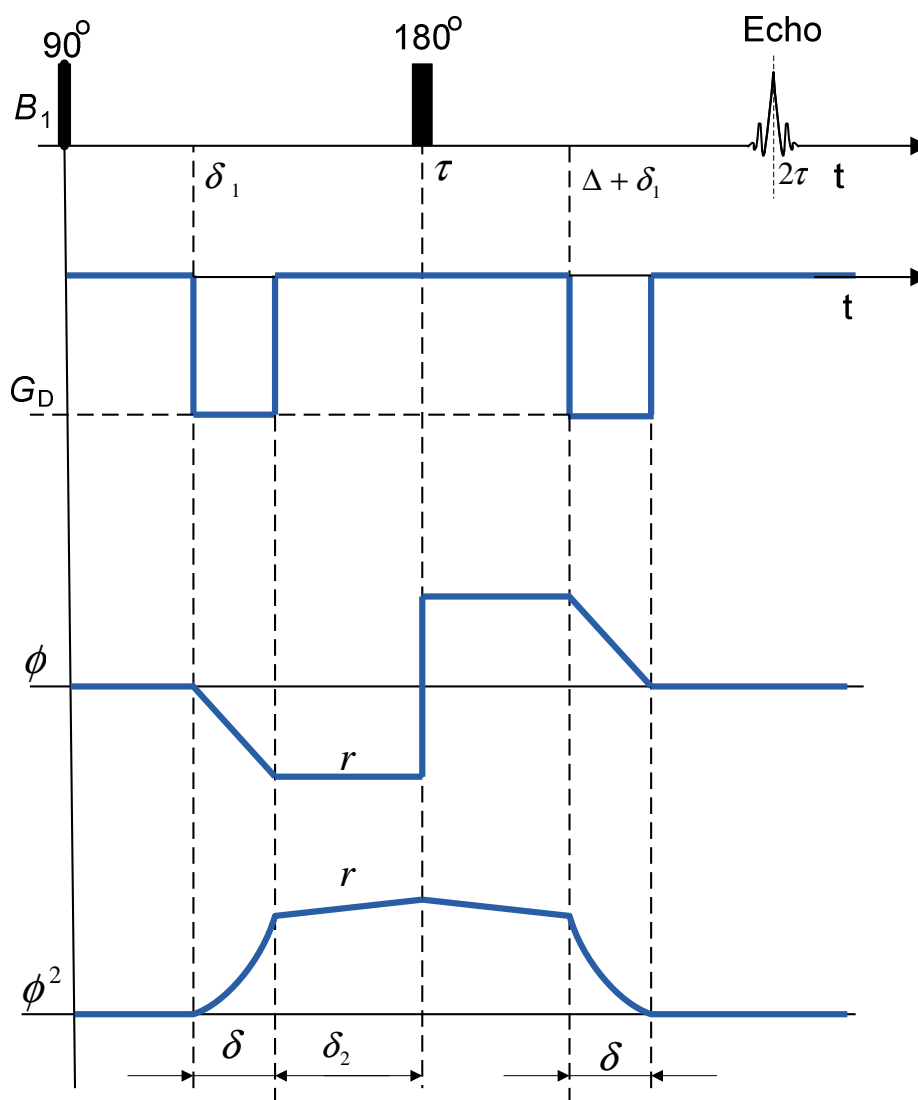
Veľkosti b -faktorov a difúzných koeficientov plus veľkosti relatívnych chýb b -faktorov a difúzných koeficientov získaných pomocou programu v MATLABE som zhrnul do tabuľky 1. Tabuľka je členená na 4 základné časti čo vyplýva zo 4 prípadov, ktoré som skúmal. V prvej časti som skúmal relatívne chyby vzniknuté pri základných parametroch vzoriek vody a vplyv 1% zmeny (zvýšenie a zníženie) oboch gradientov G_P a G_R . Pri zvýšení alebo znížení oboch gradientov boli chyby rovnaké s porovnaním chýb vzniknutých pri nastavených základných parametrov vzorky vody. V druhom prípade som skúmal zväčšenie alebo zmenšenie o 1% jedného gradientu voči druhému vzniknuté chyby boli porovnateľné s prvým prípadom konkrétne hodnoty vidno v tabuľke 1. V treťom prípade som skúmal 1% zmenu dĺžky gradientu δ vzniknuté chyby boli najnižšie zo všetkých prípadov. V poslednom štvrtom prípade som skúmal pridanie statického gradientu G_0 . Z teoretických predpokladov **statický gradient ovplyvňuje najviac chybovosť** pri zisťovaní b -faktoru alebo difúzneho koeficientu. Tento teoretický poznatok sa potvrdil aj v praxi vzniknuté chyby v tomto prípade boli najvyššie. Už po pridaní $G_0 = 10^{-3}$ vznikla relatívna chyba b -faktoru 8,1419% a relatívna chyba difúzneho koeficientu -7,5297% zvyšovaním statického gradientu sa chyby logicky zvyšovali.

Tabuľka 1 - Použitie obdĺžnikových gradientov

	1.prípady	b výpočet	b klasická metóda	D výpočet	D klasická metóda	δ_b [%]	δ_D [%]
1	a.) $G_P = 100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 100 \cdot 10^{-3}$	$4,1696 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$2,2996 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	-0.0343	0.0343
	b.) $G_P = 101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 101 \cdot 10^{-3}$	$4,2534 \cdot 10^8$	$4,2548 \cdot 10^8$	$2,2543 \cdot 10^{-9}$	$2,2536 \cdot 10^{-9}$	-0.0343	0.0343
	c.) $G_P = 99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 99 \cdot 10^{-3}$	$4,0866 \cdot 10^8$	$4,0880 \cdot 10^8$	$2,3463 \cdot 10^{-9}$	$2,3455 \cdot 10^{-9}$	-0,0343	0.0343
2	a.) $G_P = 101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 100 \cdot 10^{-3}$	$4,2566 \cdot 10^8$	$4,2548 \cdot 10^8$	$2,2526 \cdot 10^{-9}$	$2,2536 \cdot 10^{-9}$	0,0415	-0,0414
	b.) $G_P = 99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 100 \cdot 10^{-3}$	$4,0838 \cdot 10^8$	$4,0880 \cdot 10^8$	$2,3479 \cdot 10^{-9}$	$2,3455 \cdot 10^{-9}$	-0,1015	0,1016
	c.) $G_P = 100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 101 \cdot 10^{-3}$	$4,1668 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$2,3012 \cdot 10^{-9}$	$2,2959 \cdot 10^{-9}$	-0,1008	0,1009
	d.) $G_P = 100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = 99 \cdot 10^{-3}$	$4,1728 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$2,2979 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	0,0432	-0,0432
3	a.) δ znižujem o 1%	$4,0822 \cdot 10^8$	$4,0822 \cdot 10^8$	$2,3489 \cdot 10^{-9}$	$2,3489 \cdot 10^{-9}$	$2.89 \cdot 10^{-7}$	$-2.89 \cdot 10^{-7}$
	b.) δ zvyšujem o 1%	$5,1174 \cdot 10^8$	$5,1190 \cdot 10^8$	$1,8737 \cdot 10^{-9}$	$1,8731 \cdot 10^{-9}$	0.0043	-0.0043
4	a.) $G_0 = 10^{-3}$	$4,5106 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$2,1258 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	8,1419	-7,5297
	b.) $G_0 = 3 \cdot 10^{-3}$	$4,8665 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$1,9703 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	16,6747	-14,2938
	c.) $G_0 = 5 \cdot 10^{-3}$	$6,0236 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$1,5918 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	44,4162	-30,7582
	d.) $G_0 = 7 \cdot 10^{-3}$	$6,8695 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$1,3958 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	64,6967	-39,2840

4.2.) PFGSE NMR sekvencia – invertované obdĺžnikové gradienty

Skúmam chyby difúzných koeficientov za použitia záporných obdĺžnikových gradientov znovu pomocou PFGSE NMR sekvencie znázornenej na obr.6. Keďže výsledné grafy sa viac menej podobali uvádzam len ako príklad len priebehy z prvého prípadu a to na (obr.20). Všetky výsledky som uvádzal do tabuľky 2.

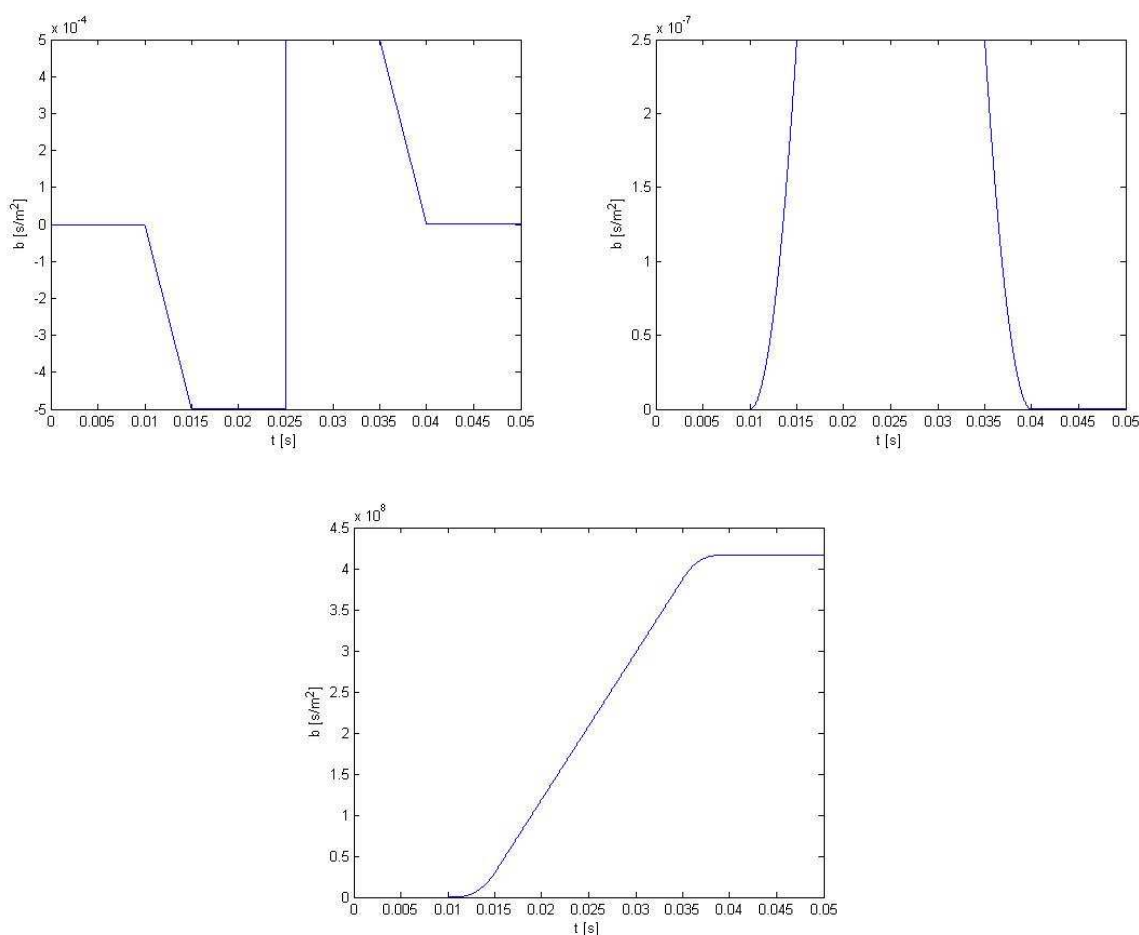


Obrázok. 19 6-intervalová PFG NMR sekvencia pre meranie difúzie s obdĺžnikovými priebehmi.

4.2.1.) Relatívna hodnota gradientu $G_P = -100 \cdot 10^{-3}$ a $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$

Parametre 6 intervalovej PFG NMR sekvencie sú rovnaké ako v prípade 4.1.1a.) vyznačené sú len zmenené hodnoty gradientov G_P a G_R

$-100 \cdot 10^{-3}$ G_P - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m,
 $-100 \cdot 10^{-3}$ G_R - relatívna hodnota gradientu 1 – 180 mT/m.



Obrázok.20 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia merania ($G_P = -100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$)

Na obr.20 sú výsledky 6-intervalovej PFGSE NMR sekvencie pri použití záporných obdĺžnikových gradientov. Vzniknutá relatívna chyba b -faktora bola $\delta_b = -0.0343\%$ a relatívna chyba difúzneho koeficientu bola $\delta_D = 0.0343\%$. Tieto chyby sú rovnaké ako pri použití kladného obdĺžnikového priebehu.

V tabuľke 2 sú uvedené výsledné hodnoty b -faktorov a difúzných koeficientov, veľkosti relatívnych chýb b -faktorov a difúzných koeficientov získaných pomocou programu písaného v MATLABE. Tabuľka 2 je rozdelená do troch častí. V prvej časti som vyhodnocoval relatívne chyby vzniknuté pri základných parametroch vzoriek vody a vplyv 1% zmeny (zvýšenie a zníženie) oboch gradientov G_p a G_R . Vzniknuté relatívne chyby boli rovnaké ako pri použití kladného obdĺžnikového gradientu. V druhom prípade som vyhodnocoval 1% zmeny jedného gradientu voči druhému a s porovnaním s výsledkov získaných pri kladnom gradiente sa chyby nejako významne nezmenili. V treťom prípade som skúmal vplyv zmeny dĺžky gradientov chyby boli najnižšie a rovnaké ako pri použití kladného gradientu.

Použitie záporného obdĺžnikového priebehu nemal významný vplyv na relatívne chyby b -faktorov a difúzných koeficientov s porovnaním s použitím kladným obdĺžnikového priebehu.

Tabuľka 2 - Použitie záporných obdĺžnikových gradientov							
	2.prípady	b výpočet	b klasická metóda	D výpočet	D klasická metóda	δ_b [%]	δ_D [%]
1	a.) $G_p = -100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$	$4,1696 \cdot 10^8$	$4,1710 \cdot 10^8$	$2,2996 \cdot 10^{-9}$	$2,2989 \cdot 10^{-9}$	-0.0343	0.0343
	b.) $G_p = -101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -101 \cdot 10^{-3}$	$4,2534 \cdot 10^8$	$4,2548 \cdot 10^8$	$2,2543 \cdot 10^{-9}$	$2,2536 \cdot 10^{-9}$	-0.0343	0.0343
	c.) $G_p = -99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -99 \cdot 10^{-3}$	$4,0866 \cdot 10^8$	$4,0880 \cdot 10^8$	$2,3463 \cdot 10^{-9}$	$2,3455 \cdot 10^{-9}$	-0.0343	0.0343
2	a.) $G_p = -101 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$	$4.1709 \cdot 10^8$	$4.1642 \cdot 10^8$	$2.2989 \cdot 10^{-9}$	$2.302 \cdot 10^{-9}$	0.1598	-0.1596
	b.) $G_p = -99 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -100 \cdot 10^{-3}$	$3.9983 \cdot 10^8$	$4.0009 \cdot 10^8$	$2.3982 \cdot 10^{-9}$	$2.3966 \cdot 10^{-9}$	-0.0664	0.0665
	c.) $G_p = -100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -101 \cdot 10^{-3}$	$4.0795 \cdot 10^8$	$4.0822 \cdot 10^8$	$2.3504 \cdot 10^{-9}$	$2.3489 \cdot 10^{-9}$	-0.0658	0.0659
	d.) $G_p = -100 \cdot 10^{-3}$ $G_R = -99 \cdot 10^{-3}$	$4.0852 \cdot 10^8$	$4.0822 \cdot 10^8$	$2.3471 \cdot 10^{-9}$	$2.3489 \cdot 10^{-9}$	0.0758	-0.0758
3	a.) δ znižujem o 1%	$4,0822 \cdot 10^8$	$4,0822 \cdot 10^8$	$2,3489 \cdot 10^{-9}$	$2,3489 \cdot 10^{-9}$	$2.89 \cdot 10^{-9}$	$-2.89 \cdot 10^{-9}$
	b.) δ zvyšujem o 1%	$5,1174 \cdot 10^8$	$5,1190 \cdot 10^8$	$1,8737 \cdot 10^{-9}$	$1,8731 \cdot 10^{-9}$	-0.0307	0.0307

4.3.) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov

Pomocou tejto metódy som vyhodnocoval vzorky vody so síranom, ktoré boli odmerané sondou o priemere 26 mm, vzorka $\text{H}_2\text{O} + \text{síran} 4x$, priemer 25 mm. Nastavené boli nasledujúce parametre:

$TE = 25 \text{ ms}$,

$T_R = 400 \text{ ms}$,

$DG = 3,5 \text{ ms}$,

$G_{xyz} = (-25, -20, -15, -10, 0, 10K, 15K, 20K, 25K) \text{ DAC}$,

$T = 23,4^\circ\text{C}$,

$\text{DELTA } (\Delta) = 17,4 \text{ ms}$,

$\text{delta } (\delta) = 3,2 \text{ ms}$,

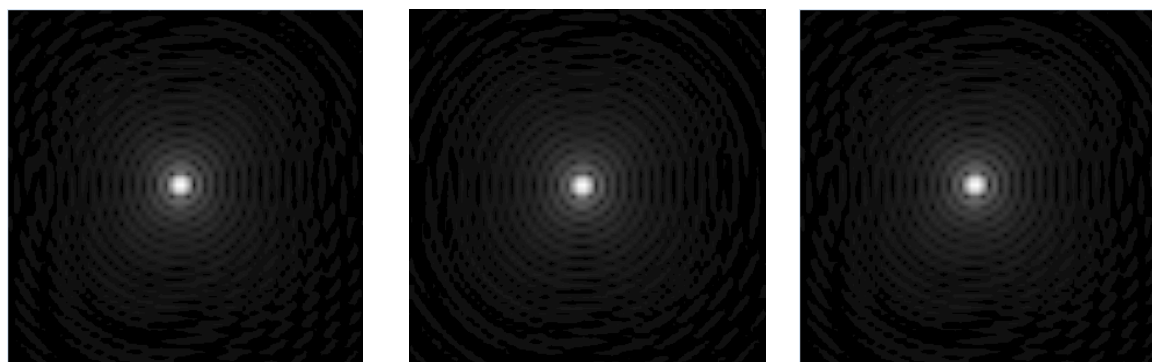
prenášaný útlm = 38,8 dB,

zisk prímača = 18 dB,

útlm prímača = 0.1 dB.

4.3.1) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_x

V tejto časti som spracovával výsledky meranej vzorky vody so síranom, ktorý bol meraný pomocou gradientu G_x . Z názvu kapitoly sa dá odvodiť, že ide o vyhodnocovanie troch obrazov, ktoré sú merané v smere osi x . Výsledkom tohto merania sú tri obrazy, ktoré sú pre názornosť zobrazené na obr.21.



Obrázok. 21 vzorka voda so síranom pri použití $G_x = 10\text{KDAC}$ (naľavo), $G_x = 0\text{KDAC}$ (v strede), $G_x = -10\text{KDAC}$ (v pravo)

Z týchto troch obrazov vytvorím výsledný obraz, z ktorého zisťujem difúzny koeficient D (difúziu). Na vytvorenie výsledného obrazu používam program Matlab. Pred spravovaním v Matlabe je potrebné odmerané vzorky vody zo síranom previesť z formátu(.mrd), ktorý majú tieto vzorky z tomografu previesť na formát (.mat) aby mohli byť následne spracované. Toto som vykonal pomocou programu MAREVISI. Pred vytvorením výsledného obrazu som si potreboval spočítať vstupné parametre a to hodnoty b -faktorov pre jednotlivé veľkosti gradientov (10, 15, 20, 25)KDAC. Tieto hodnoty som vypočítal podľa vzťahu 4.1 a dosadzoval som nastavené parametre merania, ktoré sú uvedené v kapitole 4.3 výsledky uviedol do tabuľky 4. Pre lepšiu prehľadnosť som uviedol vzorový výpočet pre G_x 10KDAC.

Vzorový výpočet pre G_x 10KDAC :

$$b = -\gamma^2 G_D^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right), \quad (4.1)$$

$$b = -(2,67 \cdot 10^8)^2 (6,42 \cdot 10^{-2})^2 (3,2 \cdot 10^{-3})^2 \left(1,74 \cdot 10^{-2} - \frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{3} \right),$$

$$b = -4,926613 \cdot 10^7 [s / m^2].$$

Tabuľka 3 - Hodnoty difúzných gradientov G_D pre jednotlivé G_x, G_y, G_z		
G_x	G_y	G_z
$6,4185 \cdot 10^{-06}$	$6,69942 \cdot 10^{-06}$	$7,14034 \cdot 10^{-06}$

V tabuľke 3 sú doporučené hodnoty difúzných gradientov G_D pre jednotlivé G_x, G_y, G_z , ktoré som dosadzoval pri počítaní b -faktorov podľa vzťahu 4.1.

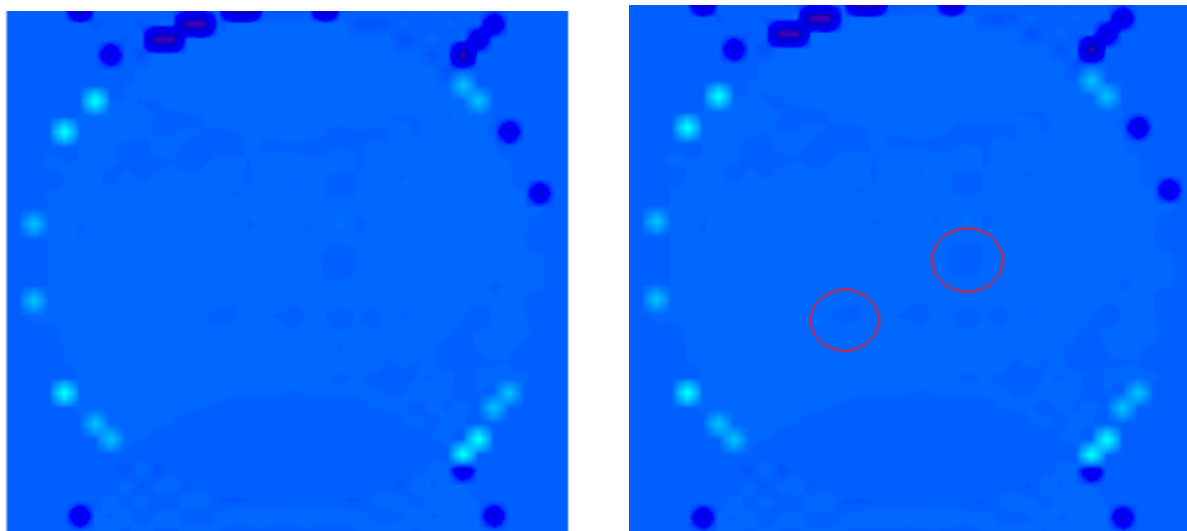
Tabuľka 4 - Hodnoty b-faktorov pre jednotlivé G_x				
G_x [KDAC]	10	15	20	25
b -faktor [s/m^2]	$-4,926 \cdot 10^7$	$-1,108 \cdot 10^8$	$-1,970 \cdot 10^8$	$-3,079 \cdot 10^8$

Po vypočítaní b -faktorov a prevedení všetkých odmeraných vzoriek do potrebného formátu som mohol následne vytvoriť výsledný obraz. Po spustení programu som zadal potrebný b -faktor napr. pre $G_x = 10$ KDAC b -faktor = $-4,926 \cdot 10^7 s/m^2$, a následne obraz pre nulový gradient, kladný gradient napr. 10KDAC a záporný gradient napr. -10KDAC. Výstupom bol výsledný obraz obr.22.



Obrázok. 22 Výstupný obraz z 3 obrazov($G_x = -10K$, $G_x = 0K$, $G_x = 10K$)

Pre lepšie vyhodnotenie výsledného obrazu je dôležité kontrast a spraviť výrez. Následne z tohto obrazu (obr.23) vyhodnocovať výsledky ako je minimálna hodnota difúzie (min), stredná hodnota difúzie (mean), maximálna hodnota difúzie (max), a štandardnú odchýlku, ktorá je ukazovateľom chýb pri meraní difúzie. Tieto znovu získam pomocou programu marevisi.

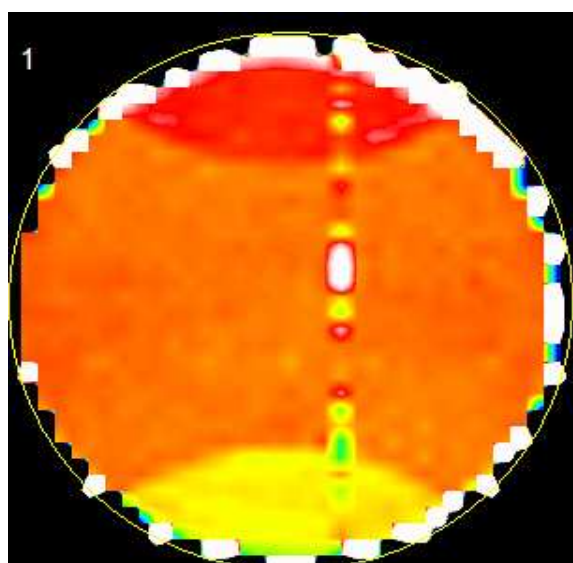
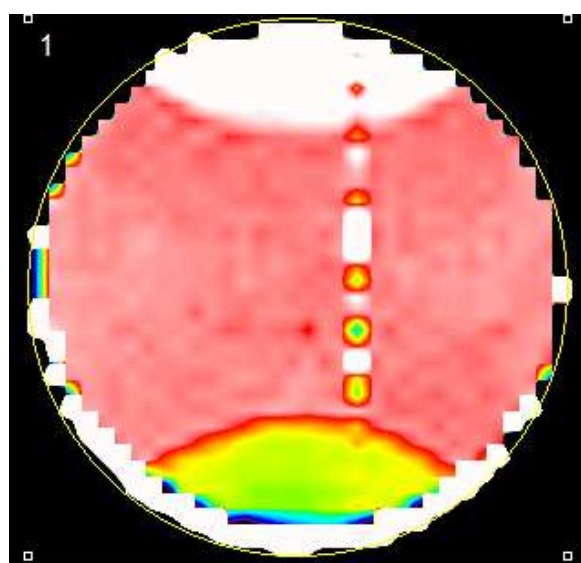
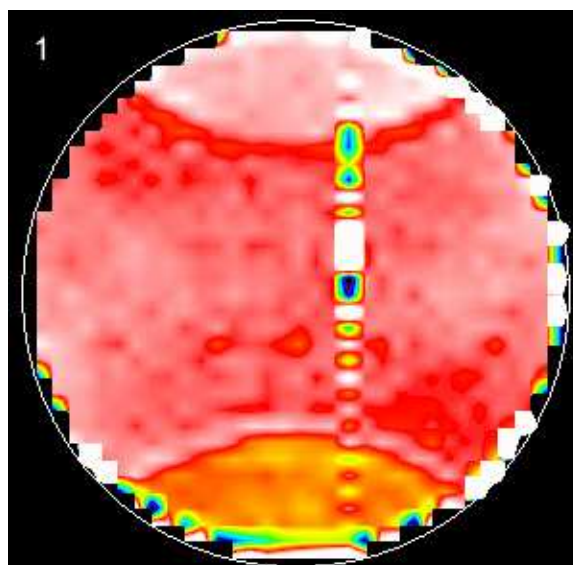
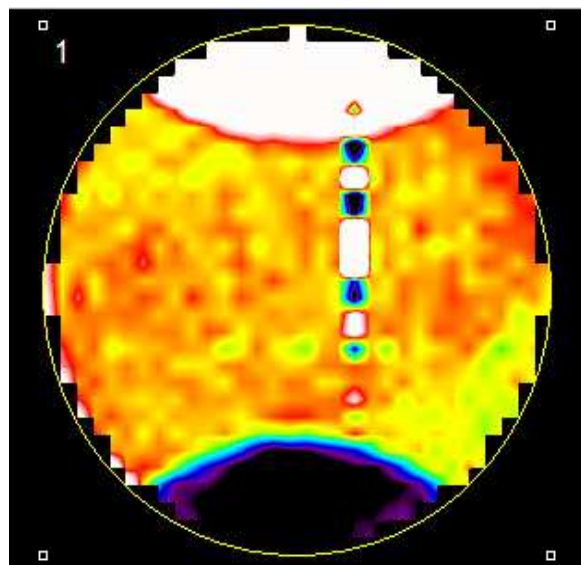


Obrázok. 23 Upravený výstupný obraz z 3 obrazov($G_x = -10K$, $G_x = 0K$, $G_x = 10K$)

Na obr.23 pri lepšom kontraste vidno zarušené oblasti, ktoré mohli byť spôsobené špinou alebo inými vplyvmi, ktoré majú nepriaznivý vplyv na výsledné hodnoty difúzií a pri vyhodnocovaní sa týmto oblastiam treba vyhnúť a vyberať si nezarušené oblasti inak by vznikali zbytočné nepresnosti.

Pre porovnanie rozdielov medzi som jednotlivými použitými gradientami v osi x som si zvolil úroveň intenzity (enter intensity level) na najvyššej úrovni $3 \cdot 10^{-9}$ (top level) a na najnižšej úrovni (low level) $-6,5 \cdot 10^{-10}$.

top level	<input type="text" value="3e-009"/>
low level	<input type="text" value="-6.50004e-010"/>



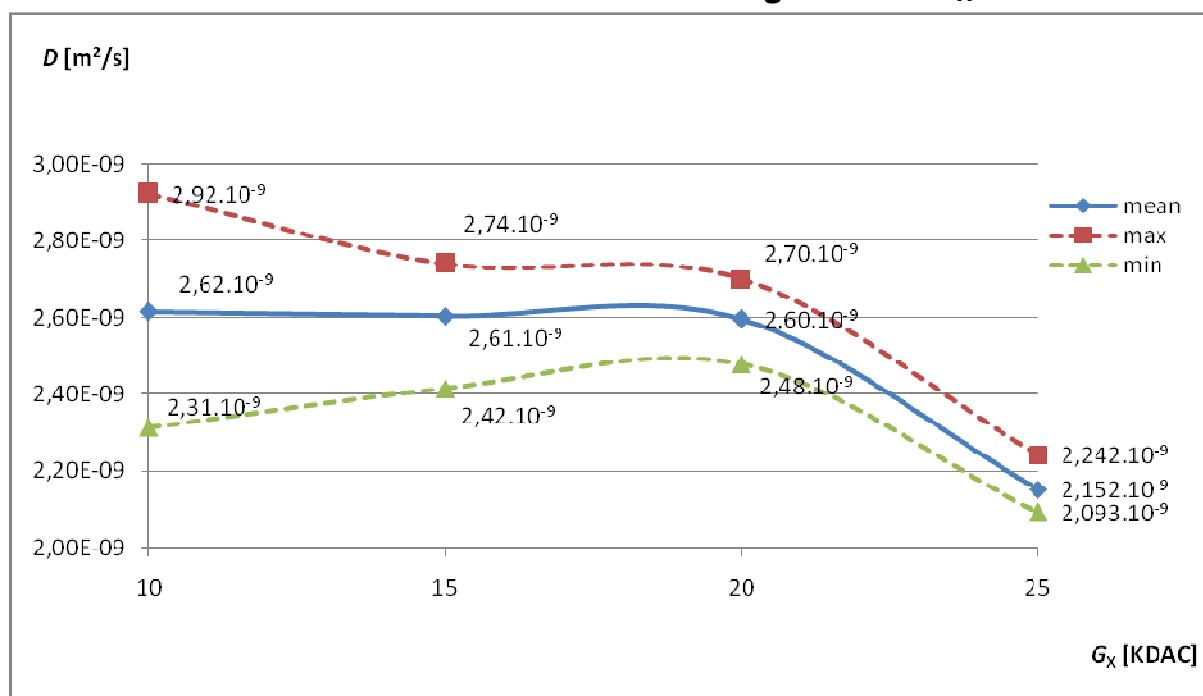
Obrázok. 24 Výstupné obrazy z 3 obrazov: ($G_x = -10K$, $G_x = 0K$, $G_x = 10K$) - naľavo hore ($G_x = -15K$, $G_x = 0K$, $G_x = 15K$) - napravo hore, ($G_x = -20K$, $G_x = 0K$, $G_x = 20K$) - naľavo dole ($G_x = -25K$, $G_x = 0K$, $G_x = 25K$) - napravo dole

Do tabuľky 5 som uviedol získané hodnoty difúzií, ktoré som získal pomocou programu MAREVISI. V prvom riadku je štandardná odchýlka pre jednotlivé veľkosti gradientov 10, 15, 20, 25 KDAC, ktorá je ukazovateľom chybovosti pri vyhodnocovaní z viacerých obrazov.

Tabuľka 5 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_x)				
Os X	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,39 \cdot 10^{-10}$	$6,10 \cdot 10^{-11}$	$4,18 \cdot 10^{-11}$	$2,81 \cdot 10^{-11}$
D_{\min} [m ² /s]	$2,31 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$2,48 \cdot 10^{-09}$	$2,10 \cdot 10^{-09}$
D_{\max} [m ² /s]	$2,92 \cdot 10^{-09}$	$2,74 \cdot 10^{-09}$	$2,70 \cdot 10^{-09}$	$2,24 \cdot 10^{-09}$
D_{mean} [m ² /s]	$2,62 \cdot 10^{-09}$	$2,61 \cdot 10^{-09}$	$2,60 \cdot 10^{-09}$	$2,15 \cdot 10^{-09}$

Výsledky som uviedol do grafu č.1 v ktorom sú vynesené hodnoty difúzií maximálne (červená farba), stredné (modrá farba), minimálne (zelená farba). Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} - 10^{-10} , čo značí že chybovosť bola veľmi malá. Z grafu ešte možno postrehnúť, že pri menších gradientoch 10KDAC sú rozptyly hodnôt medzi D_{\max} a D_{\min} väčšie ako u väčších gradientov 25KDAC. Z toho vyplýva že menšie gradienty sú viacej ovplyvňované chybami ako väčšie.

Graf č.1 Závislosť difúzie D od gradientu G_x



4.3.2) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_Y

V tejto časti som spracovával výsledky meranej vzorky, ktorý bol meraný pomocou gradientu G_Y (čo znamená gradient v smere osi y). Rovnakým postupom, ktorý bol podrobne popísaný v kapitole 4.3.1 som získal výsledky zverejnené v tejto kapitole preto znovu týmto postupom nezaoberám.

Vypočítané hodnoty b -faktorov som uviedol do tabuľky 6. Po prevedení všetkých odmeraných vzoriek do potrebného formátu som mohol následne vytvoriť výsledný obraz. Po spustení programu som zadal potrebný b -faktor napr. pre $G_Y = 10\text{KDAC}$ b -faktor = $-5,367 \cdot 10^7 \text{s/m}^2$, a následne obraz pre nulový gradient, kladný gradient napr. 10KDAC a záporný gradient napr. -10KDAC . Výstupom bol výsledný obraz z ktorého som získaval hodnoty difúzných koeficientov.

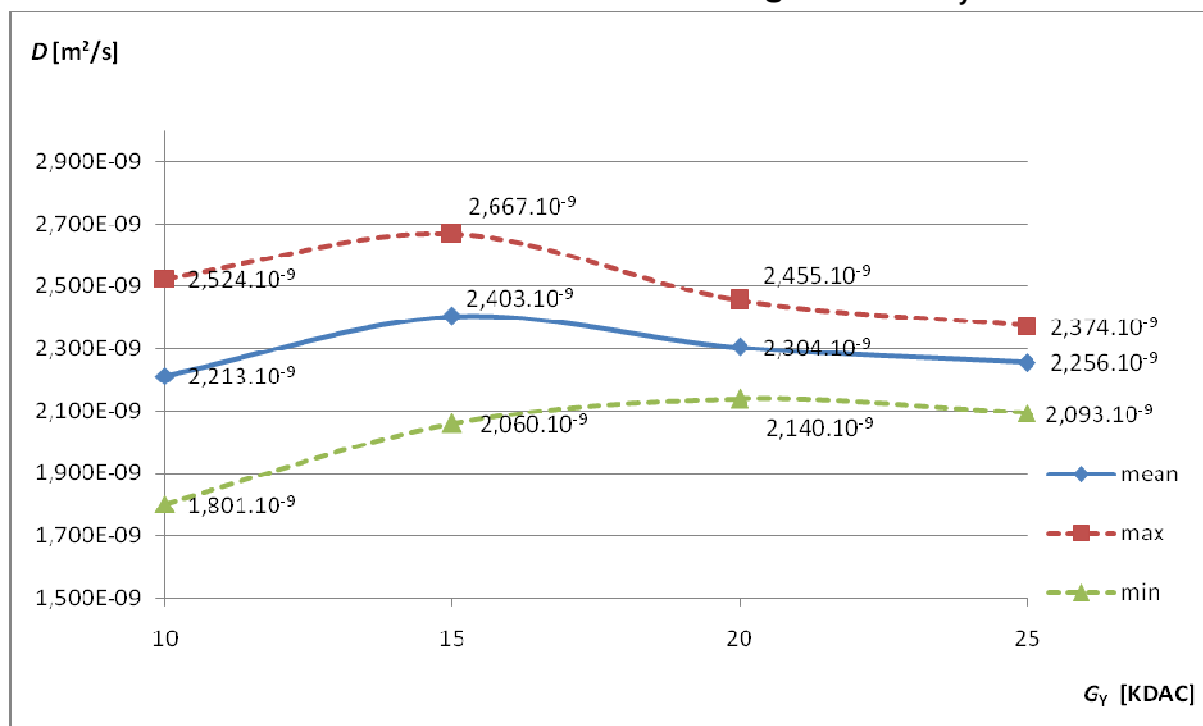
Tabuľka 6 - Hodnoty b -faktorov pre jednotlivé G_Y				
$G_Y[\text{KDAC}]$	10K	15K	20K	25K
b -faktor $[\text{s/m}^2]$	$-5,367 \cdot 10^7$	$-1,208 \cdot 10^8$	$-2,147 \cdot 10^8$	$-3,354 \cdot 10^8$

Do tabuľky 7 som uviedol získané hodnoty difúzií, ktoré som získal pomocou programu MAREVISI. V prvom riadku je štandardná odchýlka pre jednotlivé veľkosti gradientov 10, 15, 20, 25 KDAC, ktorá je ukazovateľom chybovosti pri vyhodnocovaní z viacerých obrazov.

Tabuľka 7 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_Y)				
Os Y	$G_Y=10[\text{KDAC}]$	$G_Y=15[\text{KDAC}]$	$G_Y=20[\text{KDAC}]$	$G_Y=25[\text{KDAC}]$
štandardná odchýlka	$1,280 \cdot 10^{-10}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$	$6,046 \cdot 10^{-11}$	$5,207 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{min})$ $[\text{m}^2/\text{s}]$	$1,801 \cdot 10^{-09}$	$2,060 \cdot 10^{-09}$	$2,140 \cdot 10^{-09}$	$2,093 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{max})$ $[\text{m}^2/\text{s}]$	$2,524 \cdot 10^{-09}$	$2,667 \cdot 10^{-09}$	$2,455 \cdot 10^{-09}$	$2,374 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ $[\text{m}^2/\text{s}]$	$2,213 \cdot 10^{-09}$	$2,403 \cdot 10^{-09}$	$2,304 \cdot 10^{-09}$	$2,256 \cdot 10^{-09}$

Získané výsledky difúzií som opäť vyniesol do grafu č.2. Rovnako ako v grafe č.1 sú vynesené maximálne (červená), stredné (modrá), minimálne(zelená) difúzií. Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} (20KDAC,25KDAC) - 10^{-10} (10KDAC,15KDAC), čo značí že **chybovosť bola pri použití gradientu G_y väčšia ako pri G_x** .

Graf č.2 Závislosť difúzie D od gradientu G_y



4.3.3) Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov použitím gradientu G_z

V tejto časti som spracovával výsledky meranej vzorky, ktorý bol meraný pomocou gradientu G_z (čo znamená gradient v smere osi z). rovnakým postupom, ktorý bol podrobne popísaný v kapitole 4.3.1 som získal výsledky.

Vypočítané hodnoty b -faktorov som uviedol do tabuľky 8. Po prevedení všetkých odmeraných vzoriek do potrebného formátu som mohol následne vytvoriť výsledný obraz. Po spustení programu som zadal potrebný b -faktor napr. pre $G_z=10$ KDAC b -faktor = $-6,096^8$ s/ m^2 , a následne obraz pre nulový gradient, kladný gradient napr.10KDAC a záporný gradient napr.-10KDAC. Výstupom bol výsledný obraz z ktorého som získaval hodnoty difúzných koeficientov.

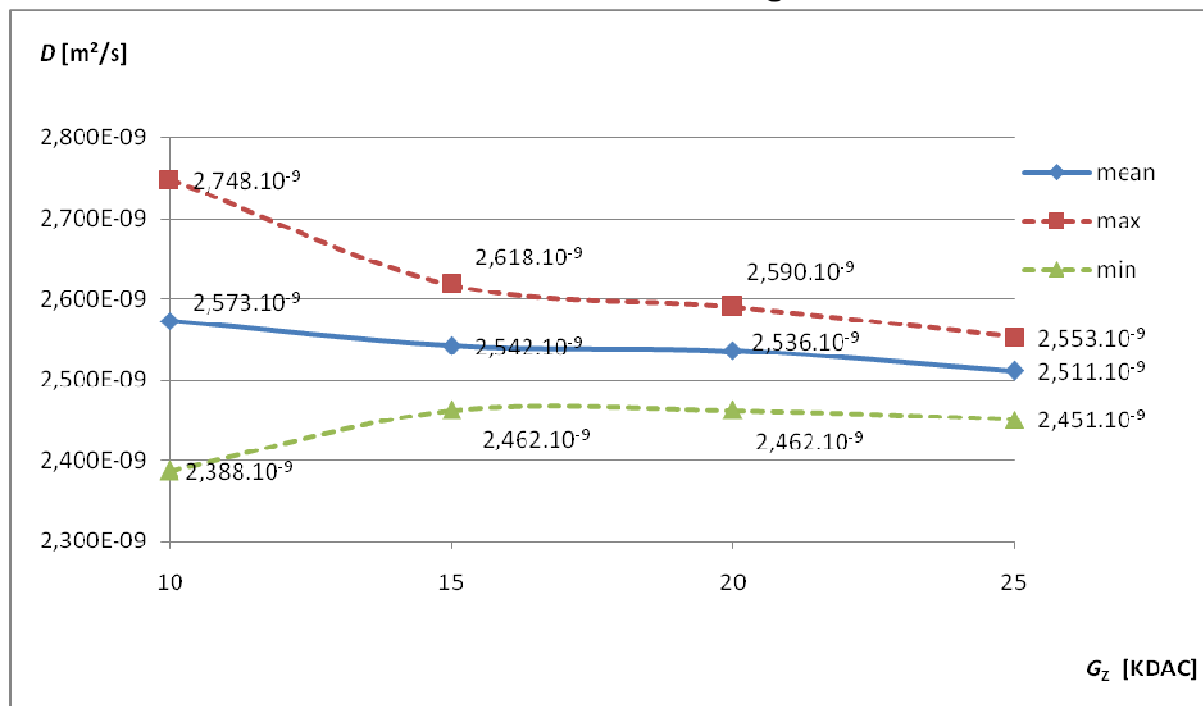
Tabuľka 8 - Hodnoty b -faktorov pre jednotlivé G_z				
G_x [KDAC]	10K	15K	20K	25K
b -faktor [s/ m^2]	$-6,096^8$	$-1,3720^8$	$-2,439^8$	$-3,810+0^8$

Stredné hodnoty difúzií a ich štandardné odchýlky, ktoré som dostal z jednotlivých prípadov pomocou programu MAREVISI som zhrnul pre porovnanie v tabuľke č.9. V prvom riadku je štandardná odchýlka pre jednotlivé veľkosti gradientov 10, 15, 20, 25 KDAC, ktorá je ukazovateľom chybovosti pri vyhodnocovaní z viacerých obrazov.

Tabuľka 9 - Vyhodnocovanie difúzie z 3 obrazov(G_z)				
Os Z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$7,055 \cdot 10^{-11}$	$3,773 \cdot 10^{-11}$	$2,95 \cdot 10^{-11}$	$2,33 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m ² /s]	$2,388 \cdot 10^{-09}$	$2,462 \cdot 10^{-09}$	$2,462 \cdot 10^{-09}$	$2,451 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m ² /s]	$2,748 \cdot 10^{-09}$	$2,618 \cdot 10^{-09}$	$2,590 \cdot 10^{-09}$	$2,553 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m ² /s]	$2,573 \cdot 10^{-09}$	$2,542 \cdot 10^{-09}$	$2,536 \cdot 10^{-09}$	$2,511 \cdot 10^{-09}$

Závislosť difúzie D od gradientu G_z som uviedol do grafu č.4. Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} , čo značí že **chybovosť bola najmenšia z predchádzajúcich prípadov**. Pri menších gradientoch 10KDAC sú rozptyly hodnôt medzi D_{\max} a D_{\min} väčšie ako u väčších gradientov 25KDAC rovnako ako u predchádzajúcich prípadov.

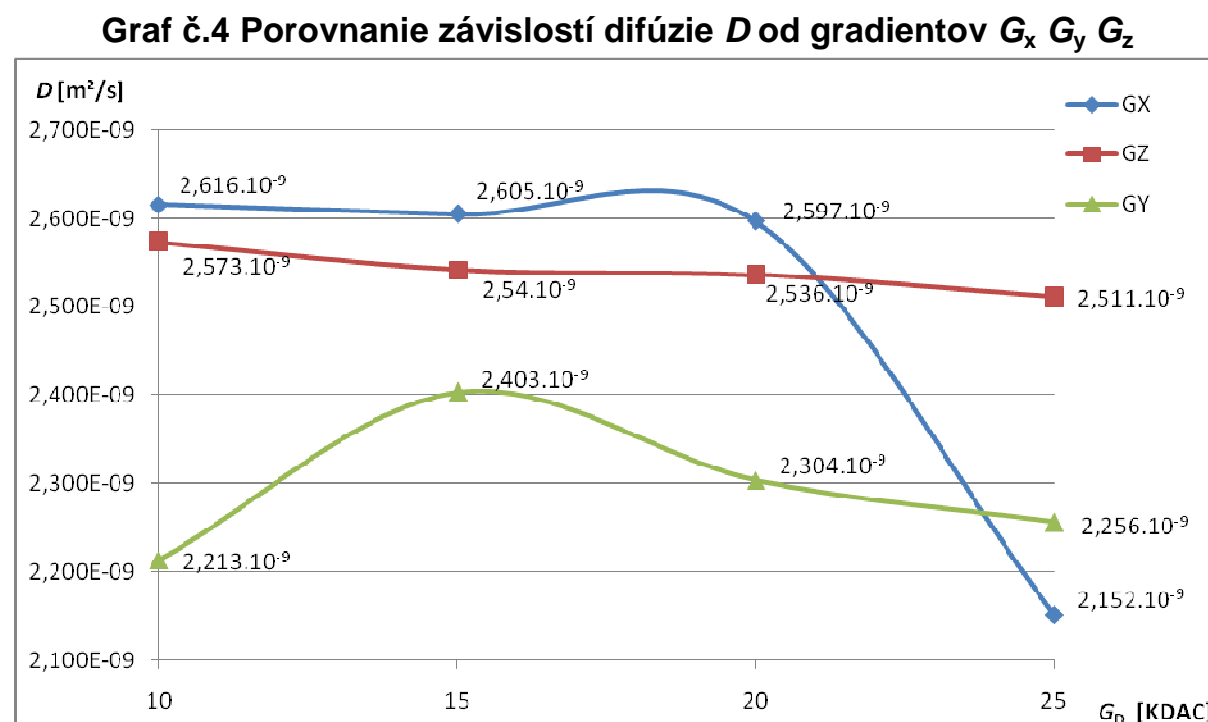
Graf č.3 Závislosť difúzie D od gradientu G_z



V tabuľke 10 som pre porovnanie medzi použitiami gradientov G_x , G_y , G_z súhrne uviedol ich štandardné odchýlky a stredné hodnoty difúzných koeficientov. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti pri použití 10KDAC boli spôsobené tým, že statický gradient ovplyvňuje viac menšie gradienty ako väčšie.

Tabuľka 10 - Vyhodnocovanie z 3 obrazov (G_x, G_y, G_z)				
G_x	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,387 \cdot 10^{-10}$	$6,103 \cdot 10^{-11}$	$4,178 \cdot 10^{-11}$	$2,811 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,616 \cdot 10^{-9}$	$2,605 \cdot 10^{-9}$	$2,597 \cdot 10^{-9}$	$2,55 \cdot 10^{-9}$
G_y	$G_y=10$ [KDAC]	$G_y=15$ [KDAC]	$G_y=20$ [KDAC]	$G_y=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,28 \cdot 10^{-10}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$	$6,046 \cdot 10^{-11}$	$5,207 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,213 \cdot 10^{-9}$	$2,403 \cdot 10^{-9}$	$2,304 \cdot 10^{-9}$	$2,256 \cdot 10^{-9}$
G_z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$7,055 \cdot 10^{-11}$	$3,773 \cdot 10^{-11}$	$2,95 \cdot 10^{-11}$	$2,338 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,573 \cdot 10^{-9}$	$2,542 \cdot 10^{-9}$	$2,536 \cdot 10^{-9}$	$2,511 \cdot 10^{-9}$

Porovnanie závislostí lepšie vyjadruje graf č.4 ako tabuľka 10. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti 10KDAC sú v grafe č.4 jasne vidno. Náhlý pokles hodnoty difúzneho koeficientu pri použití gradientu 25KDAC G_x mohol byť spôsobený zlým odstupom signál šum.

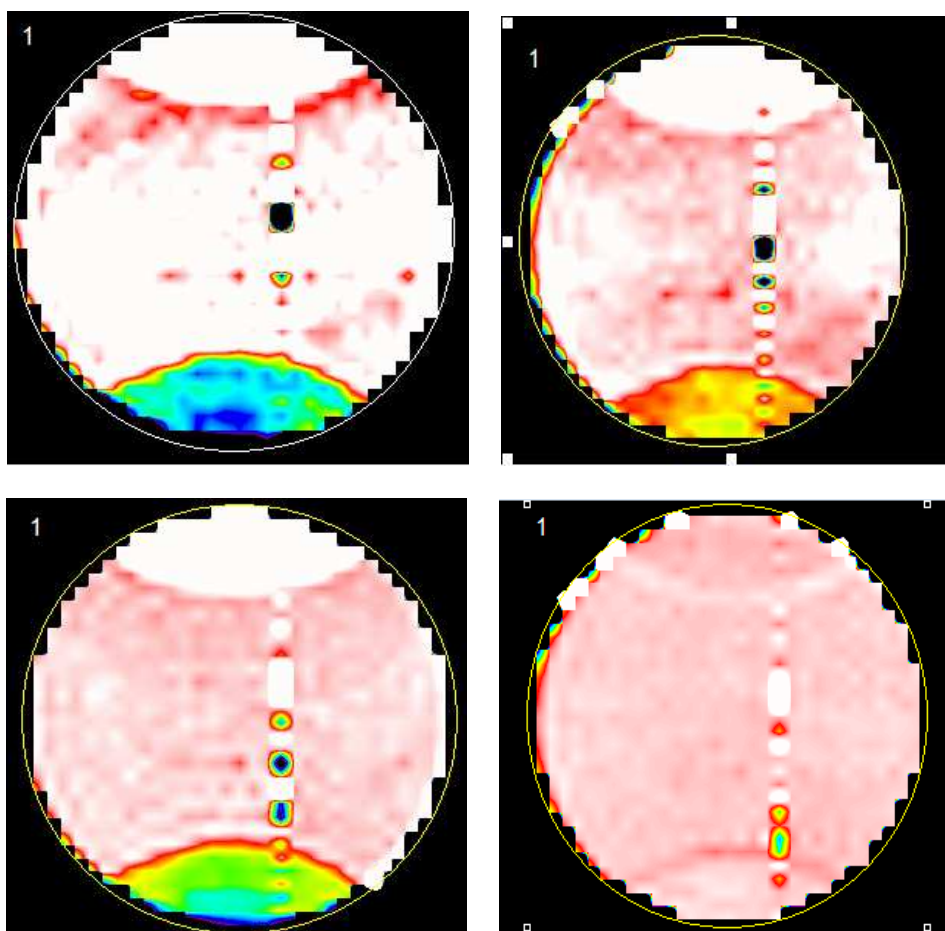


4.4.1) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu

V tejto kapitole sa zaoberám vyhodnocovaním difúzie z dvoch obrazov a to z obrazu, ktorý bol nameraný pri nulovom gradiente a pri kladnom gradiente. V podstate ide o ten istý spôsob ako vyhodnocovanie z troch obrazov ale tento spôsob je menej presnejší a vznikajú väčšie chyby, ktoré vznikajú vplyvom nehomogénneho prostredia. Výsledný obraz som vytvoril pomocou programu v Matlabe, kde ako vstupné parametre boli b -faktor a potrebné odmerané dva obrazy ktoré som znovu previedol pred spracovaním v programe MAREVISI.

4.4.1) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_x

Pre porovnanie rozdielov medzi som jednotlivými použitými gradientami v osi x som si zvolil úrovně intenzity (enter intensity level) na najvyššej úrovni 3.10^{-9} (top level) a na najnižšej úrovni (low level) $-6,5.10^{-10}$.



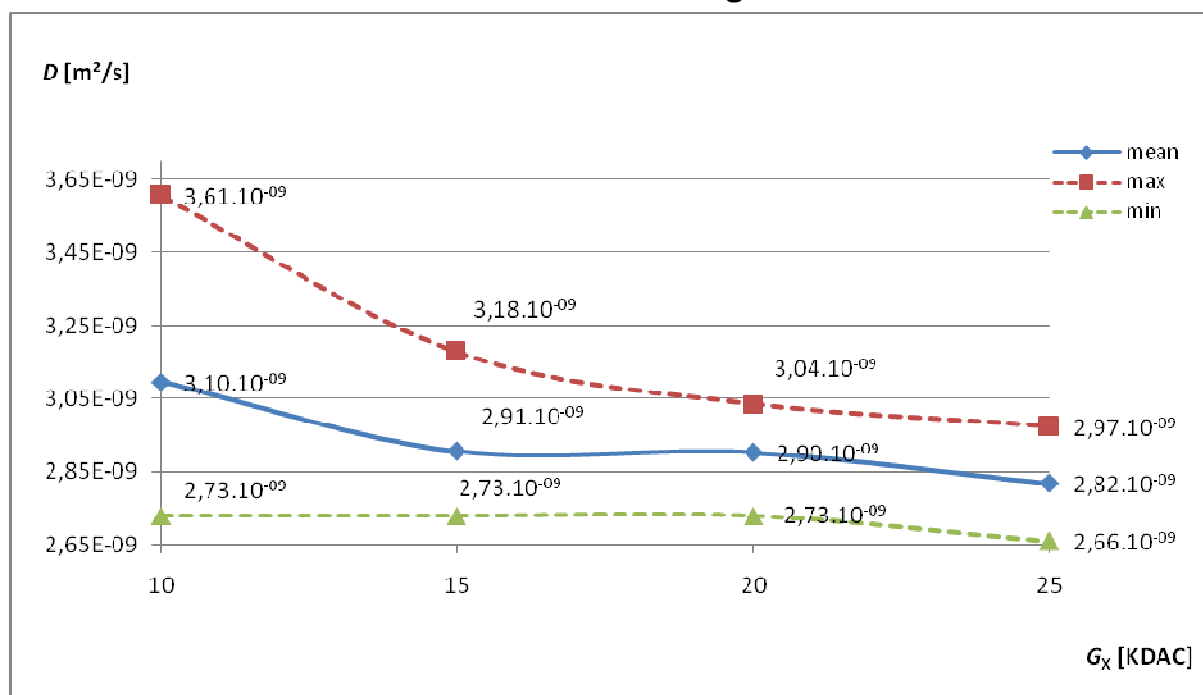
Obrázok. 25 Výstupné obrazy z kladného a nulového gradientu v osi G_x : ($G_x = -10K$, $G_x = 0K$, $G_x = 10K$) - naľavo hore, ($G_x = -15K$, $G_x = 0K$, $G_x = 15K$) - napravo hore, ($G_x = -20K$, $G_x = 0K$, $G_x = 20K$) - naľavo dole, ($G_x = -25K$, $G_x = 0K$, $G_x = 25K$) - napravo dole

V tabuľke 11 sú uvedené znovu stredné hodnoty difúzií a ich štandardné odchýlky, ktoré som získal z jednotlivých prípadov pomocou programu MAREVISI. Ak porovnam hodnoty štandardných odchýliek z hodnotami zisťovaných pri vyhodnocovaní z troch obrazov pri použití gradientu G_x sú vyššie čo značí väčšiu nepresnosť. Stredné hodnoty difúzných koeficientov sú znovu vyššie čo je pravdepodobne spôsobené vplyvom nehomogenity prostredia.

Tabuľka 11 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného gradientu (G_x)				
Os X	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$2,00 \cdot 10^{-10}$	$9,77 \cdot 10^{-11}$	$5,22 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m^2/s]	$2,73 \cdot 10^{-09}$	$2,73 \cdot 10^{-09}$	$2,73 \cdot 10^{-09}$	$2,66 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m^2/s]	$3,61 \cdot 10^{-09}$	$3,18 \cdot 10^{-09}$	$3,04 \cdot 10^{-09}$	$2,97 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$3,10 \cdot 10^{-09}$	$2,91 \cdot 10^{-09}$	$2,90 \cdot 10^{-09}$	$2,82 \cdot 10^{-09}$

Hodnoty z tabuľky 11 som vyniesol do grafu č.5 v ktorom sú vynesené hodnoty difúzií maximálne (červená farba), stredné (modrá farba), minimálne (zelená farba). Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} - 10^{-10} , podobne ako vyhodnocovaní z troch obrazov. Z grafu ešte možno postrehnúť, že pri menších gradientoch 10KDAC sú rozptyly hodnôt medzi D_{\max} a D_{\min} väčšie ako u väčších gradientov 25KDAC. Z toho vyplýva že menšie gradienty sú viacej ovplyvňované ako väčšie táto vlastnosť sa potvrdzuje pri použití všetkých gradientov.

Graf č.5 Závislosť difúzie D od gradientu G_x pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu



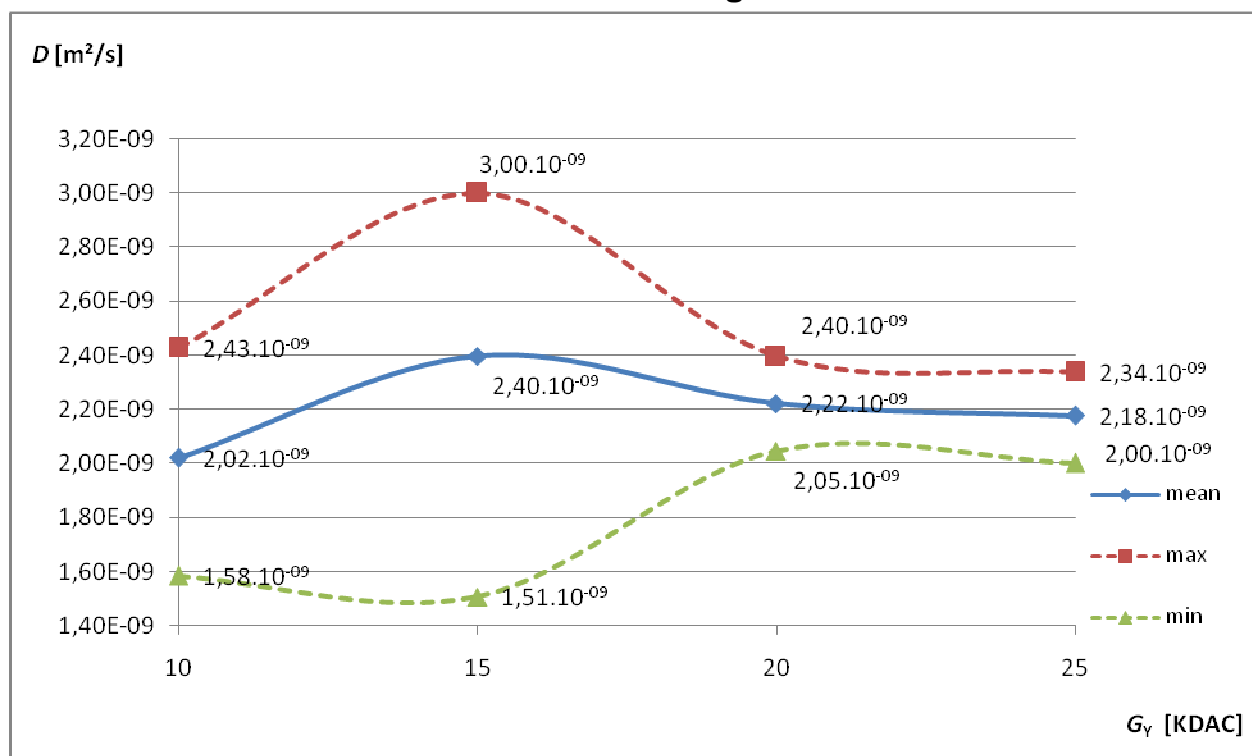
4.4.2) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_Y

V tabuľke 12 sú uvedené znovu stredné hodnoty difúzií a ich štandardné odchýlky, ktoré som získal z jednotlivých prípadov pomocou programu MAREVISI. Ak porovnam hodnoty štandardných odchýliek z hodnotami zisťovanými pri vyhodnocovaní z troch obrazov pri použití gradientu G_Y sú vyššie čo značí väčšiu nepresnosť. Stredné hodnoty difúzných koeficientov sú znovu vyššie čo je pravdepodobne spôsobené vplyvom nehomogenity prostredia.

Tabuľka 12 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného (G_Y)				
Os Y	$G_Y=10[\text{KDAC}]$	$G_Y=15[\text{KDAC}]$	$G_Y=20[\text{KDAC}]$	$G_Y=25[\text{KDAC}]$
štandardná odchýlka	$1,56 \cdot 10^{-10}$	$3,49 \cdot 10^{-10}$	$8,29 \cdot 10^{-11}$	$6,32 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{min})$ [m ² /s]	$1,58 \cdot 10^{-09}$	$1,51 \cdot 10^{-09}$	$2,05 \cdot 10^{-09}$	$2,00 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{max})$ [m ² /s]	$2,43 \cdot 10^{-09}$	$3,00 \cdot 10^{-09}$	$2,40 \cdot 10^{-09}$	$2,34 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m ² /s]	$2,02 \cdot 10^{-09}$	$2,40 \cdot 10^{-09}$	$2,22 \cdot 10^{-09}$	$2,18 \cdot 10^{-09}$

Hodnoty z tabuľky 12 som vyniesol do grafu č.6 v ktorom sú vynesené hodnoty difúzií maximálne (červená farba), stredné (modrá farba), minimálne (zelená farba). Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} - 10^{-10} , podobne ako vyhodnocovaní z troch obrazov.

Graf č.6 Závislosť difúzie D od gradientu G_y pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu



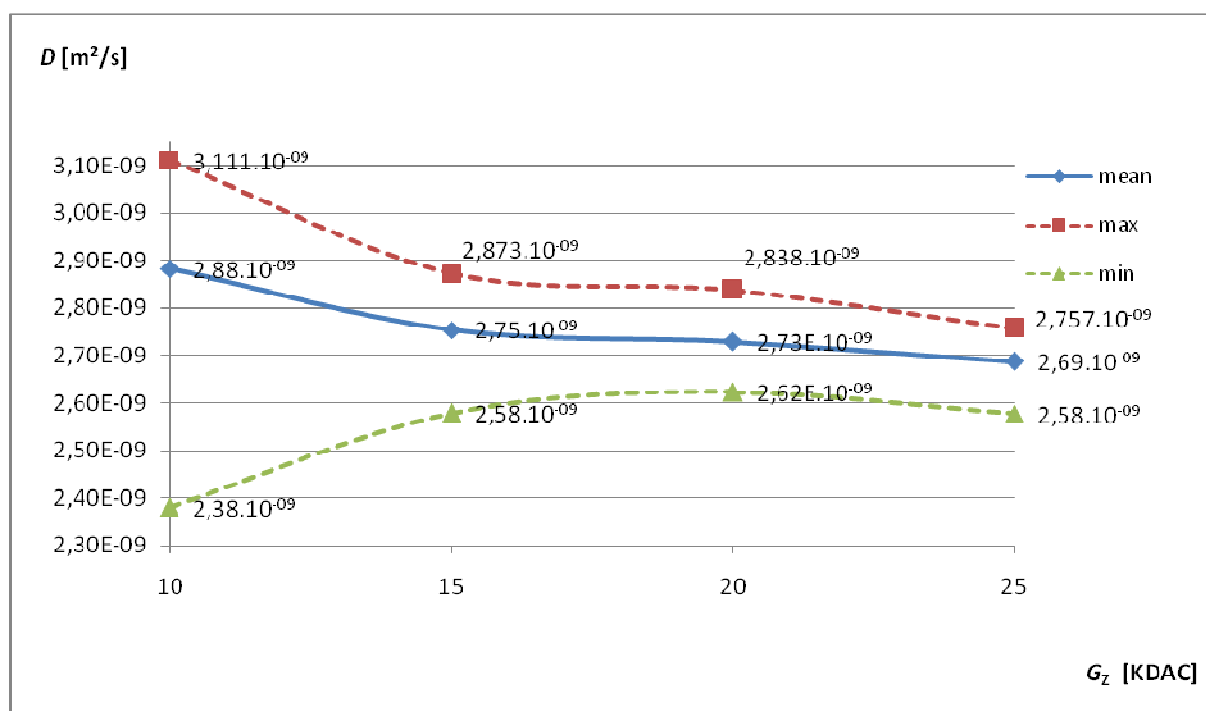
4.4.3) Vyhodnocovanie difúzie z kladného a nulového gradientu G_z

V tabuľke 13 sú uvedené znovu stredné hodnoty difúzií a ich štandardné odchýlky, ktoré som získal z jednotlivých prípadov pomocou programu MAREVISI. Ak porovnam hodnoty štandardných odchýliek z hodnotami zisťovanými pri vyhodnocovaní z troch obrazov pri použití gradientu G_z sú vyššie čo značí väčšiu nepresnosť. Hodnota odchýlky pri $G_z=15$ KDAC sa zväčšila dokonca o jednu radu.

Tabuľka 13 - Vyhodnocovanie z nulového a kladného gradientu (G_z)				
Os Z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,22 \cdot 10^{-10}$	$5,47 \cdot 10^{-11}$	$3,81 \cdot 10^{-11}$	$3,05 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m^2/s]	$2,38 \cdot 10^{-09}$	$2,58 \cdot 10^{-09}$	$2,62 \cdot 10^{-09}$	$2,58 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m^2/s]	$3,11 \cdot 10^{-09}$	$2,87 \cdot 10^{-09}$	$2,84 \cdot 10^{-09}$	$2,76 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,88 \cdot 10^{-09}$	$2,75 \cdot 10^{-09}$	$2,73 \cdot 10^{-09}$	$2,69 \cdot 10^{-09}$

Hodnoty z tabuľky 13 som vyniesol do grafu č.7 v ktorom sú vynesené hodnoty difúzií maximálne (červená farba), stredné (modrá farba), minimálne (zelená farba). Hodnoty štandardných odchýliek sa rádovo pohybovali 10^{-11} - 10^{-10} , podobne ako vyhodnocovaní z troch obrazov.

Graf č.7 Závislosť difúzie D od gradientu G_z pri vyhodnocovaní z nulového a kladného gradientu

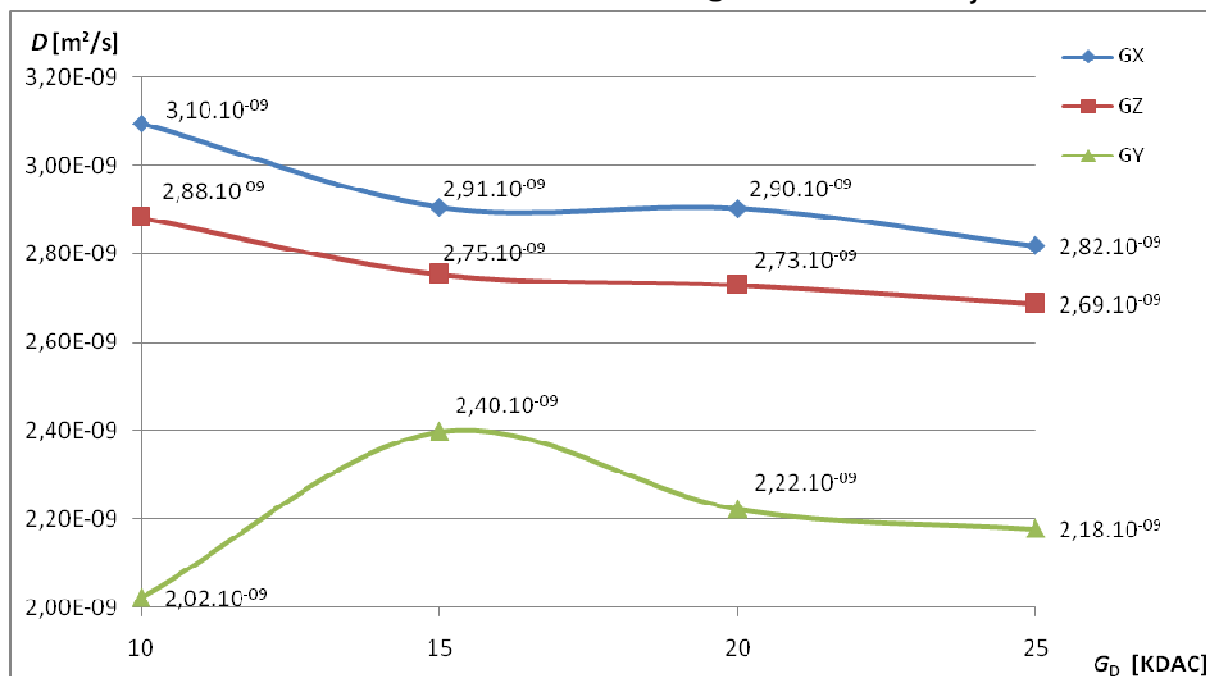


V tabuľke 14 som pre porovnanie medzi použitiami gradientov G_x , G_y , G_z súhrne uviedol ich štandardné odchýlky a stredné hodnoty difúzných koeficientov. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti pri použití 10KDAC boli spôsobené tým, že statický gradient ovplyvňuje viac menšie gradienty ako väčšie.

Tabuľka 14 - Vyhodnocovanie z nulových kladných gradientov (G_x, G_y, G_z)				
G_x	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$2,00 \cdot 10^{-10}$	$9,77 \cdot 10^{-11}$	$5,22 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$3,10 \cdot 10^{-9}$	$2,91 \cdot 10^{-9}$	$2,90 \cdot 10^{-9}$	$2,82 \cdot 10^{-9}$
G_y	$G_y=10$ [KDAC]	$G_y=15$ [KDAC]	$G_y=20$ [KDAC]	$G_y=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,56 \cdot 10^{-10}$	$3,49 \cdot 10^{-10}$	$8,29 \cdot 10^{-11}$	$6,32 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,02 \cdot 10^{-9}$	$2,40 \cdot 10^{-9}$	$2,22 \cdot 10^{-9}$	$2,18 \cdot 10^{-9}$
G_z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,22 \cdot 10^{-10}$	$5,47 \cdot 10^{-11}$	$3,81 \cdot 10^{-11}$	$3,05 \cdot 10^{-11}$
$D(\text{mean})$ [m^2/s]	$2,88 \cdot 10^{-9}$	$2,75 \cdot 10^{-9}$	$2,73 \cdot 10^{-9}$	$2,69 \cdot 10^{-9}$

Porovnanie závislostí lepšie vyjadruje graf č.8 ako tabuľka 14. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti 10KDAC sú v grafe č.4 jasne vidno. Náhlý pokles hodnoty difúzneho koeficientu pri použití gradientu 25KDAC G_x mohol byť spôsobený zlým odstupom signál šum.

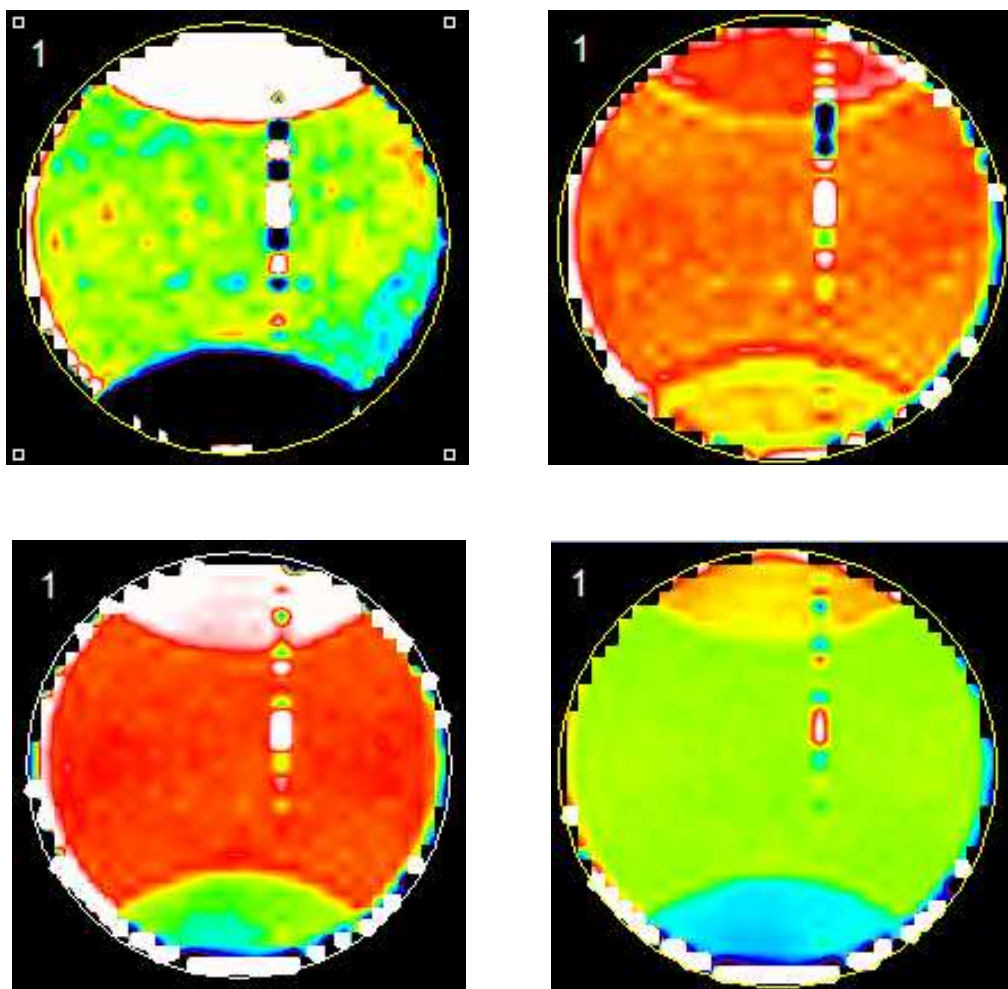
Graf č.8 Závislosť difúzie D od gradientov G_x G_y G_z



4.4.4) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_x

V tejto kapitole sa zaoberám vyhodnocovaním difúzie z dvoch obrazov a to z obrazu, ktorý bol nameraný pri nulovom gradiente a pri zápornom gradiente. V podstate ide o ten istý spôsob ako vyhodnocovanie z troch obrazov ale tento spôsob je menej presnejší a vznikajú väčšie chyby, ktoré vznikajú vplyvom nehomogénneho prostredia. Výsledný obraz som vytvoril pomocou programu v Matlabe, kde ako vstupné parametre boli b -faktor a potrebné odmerané dva obrazy ktoré som znovu previedol pred spracovaním v programe MAREVISI.

Pre porovnanie rozdielov medzi som jednotlivými použitými gradientami v osi x som si zvolil úrovne intenzity (enter intensity level) na najvyššej úrovni $3 \cdot 10^{-9}$ (top level) a na najnižšej úrovni (low level) $-6,5 \cdot 10^{-10}$.



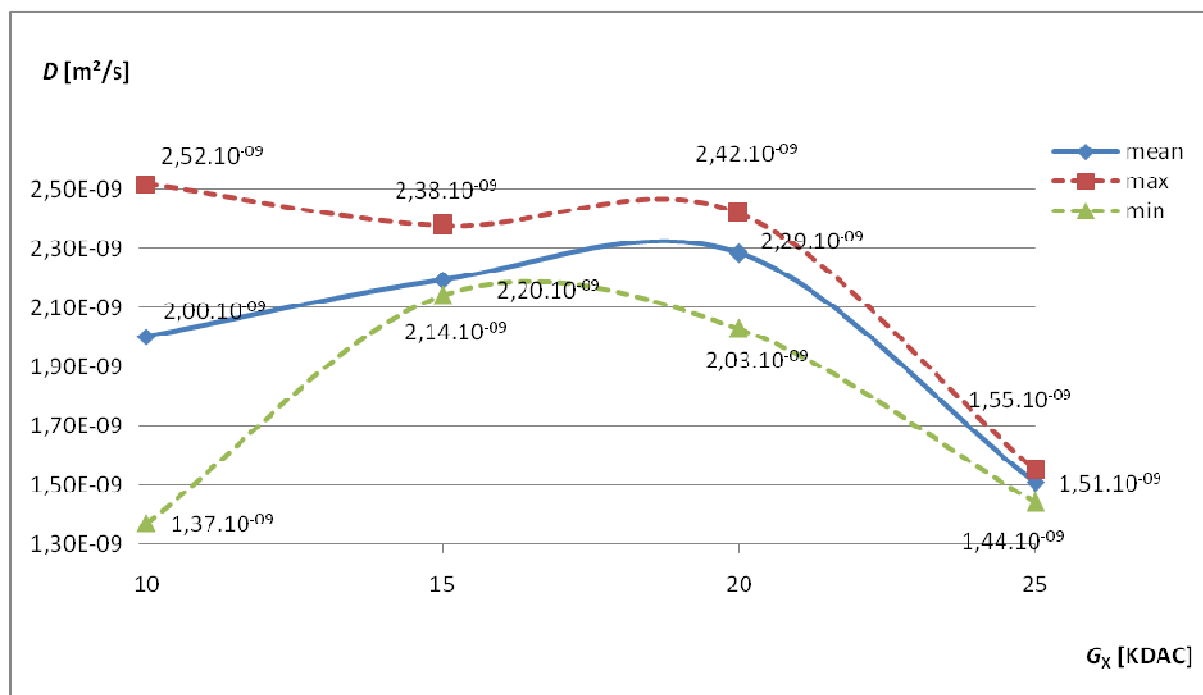
Obrázok.26 výstupné obrazy zo záporného a nulového gradientu v osi G_x : ($G_x = -10K$, $G_x = 0K$, $G_x = 10K$) - naľavo hore, ($G_x = -15K$, $G_x = 0K$, $G_x = 15K$) - napravo hore, ($G_x = -20K$, $G_x = 0K$, $G_x = 20K$) - naľavo dole, ($G_x = -25K$, $G_x = 0K$, $G_x = 25K$) - napravo dole

Výsledky z vyhodnocovania nulového a záporného gradientu som uviedol do tabuľky 15. Pre jednotlivé veľkosti gradientu G_x (10,15,20,25)KDAC som uviedol hodnoty D difúzných koeficientov. Hodnoty štandardných odchýliek sa pohybovali od $3,47 \cdot 10^{-11}$ pri 25KDAC $1,49 \cdot 10^{-10}$ pri 10KDAC. Rádovo sa boli rovnaké ako pri zisťovaní z troch obrazov.

Tabuľka 15 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného gradientu (G_x)				
Os X	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
sredná odchýlka	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$6,96 \cdot 10^{-11}$	$5,35 \cdot 10^{-11}$	$3,47 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m ² /s]	$1,37 \cdot 10^{-09}$	$2,14 \cdot 10^{-09}$	$2,03 \cdot 10^{-09}$	$1,44 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m ² /s]	$2,52 \cdot 10^{-09}$	$2,38 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$1,55 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m ² /s]	$2,00 \cdot 10^{-09}$	$2,20 \cdot 10^{-09}$	$2,29 \cdot 10^{-09}$	$1,51 \cdot 10^{-09}$

V grafe č.9 sú vynesené závislosti difúzie D (difúzných koeficientov) pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu. Znovu si treba všimnúť už toľko krát opakované, že statický gradient ovplyvňuje menšie gradienty v tomto prípade G_x viacej ako väčšie.

Graf č.9 Závislosť difúzie D od gradientu G_x pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu



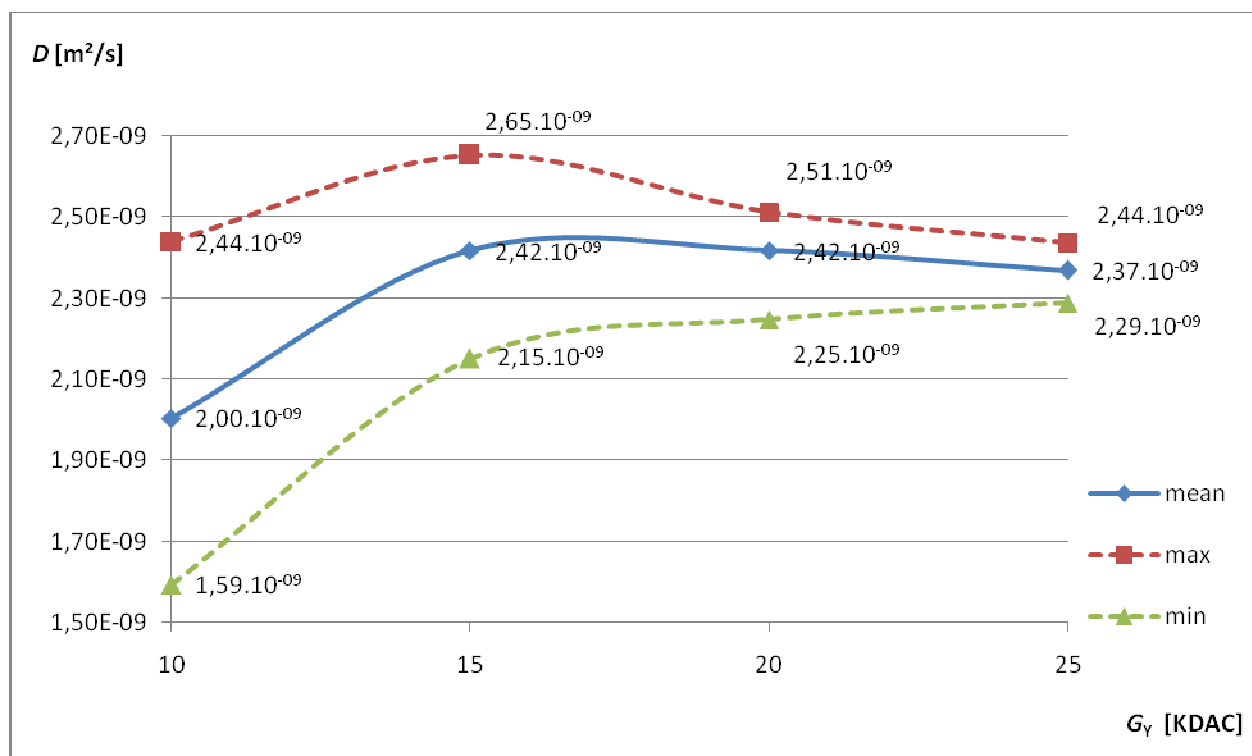
4.4.5) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_y

Výsledky z vyhodnocovania nulového a záporného gradientu som uviedol do tabuľky 15. Pre jednotlivé veľkosti gradientu G_y (10,15,20,25)KDAC som uviedol hodnoty D difúzných koeficientov. Hodnoty štandardných odchýliek sa pohybovali od $4,10 \cdot 10^{-11}$ pri 25KDAC $1,62 \cdot 10^{-10}$ pri 10KDAC. Rádovo sa boli rovnaké ako pri zisťovaní z troch obrazov.

Tabuľka 16 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného (G_y)				
Os Y	$G_y=10$ [KDAC]	$G_y=15$ [KDAC]	$G_y=20$ [KDAC]	$G_y=25$ [KDAC]
sredná odchýlka	$1,62 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-10}$	$6,35 \cdot 10^{-11}$	$4,10 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m ² /s]	$1,59 \cdot 10^{-09}$	$2,15 \cdot 10^{-09}$	$2,25 \cdot 10^{-09}$	$2,29 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m ² /s]	$2,44 \cdot 10^{-09}$	$2,65 \cdot 10^{-09}$	$2,51 \cdot 10^{-09}$	$2,44 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m ² /s]	$2,00 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$2,37 \cdot 10^{-09}$

V grafe č.10 sú vynesené závislosti difúzie D (difúzných koeficientov) pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu. Znovu si treba všimnúť už toľko krát opakované, že statický gradient ovplyvňuje menšie gradienty v tomto prípade G_y viac ako väčšie.

Graf č.10 Závislosť difúzie D od gradientu G_y pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu



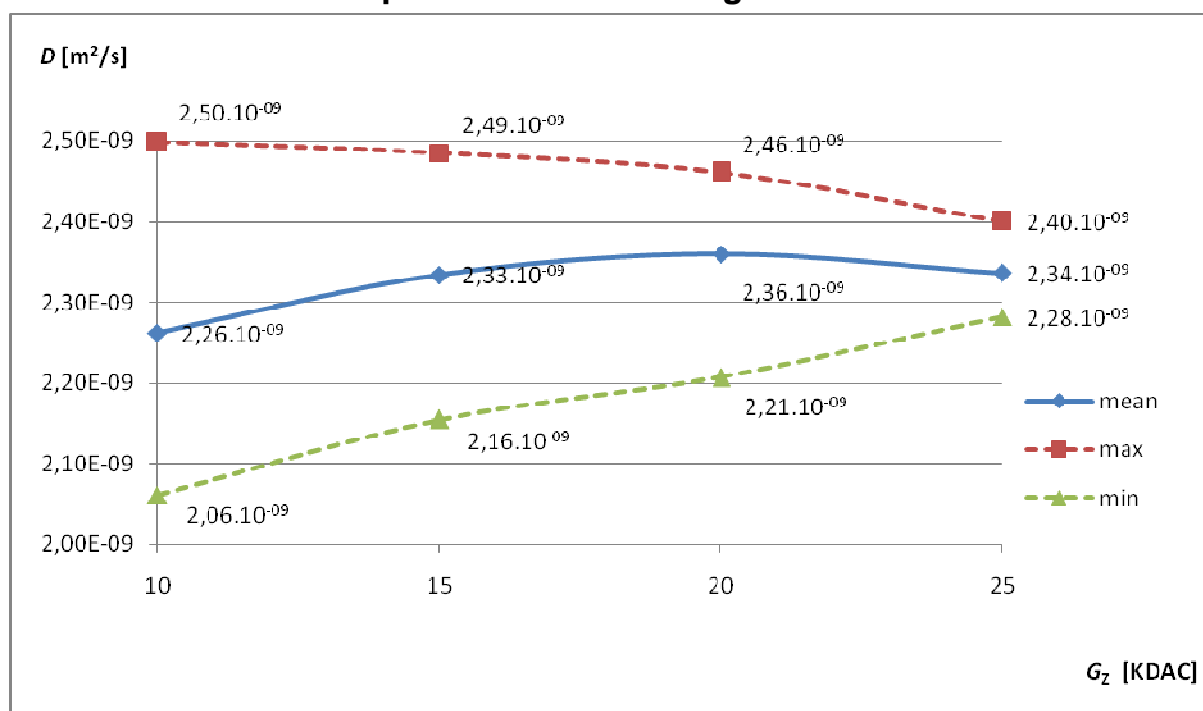
4.4.6) Vyhodnocovanie difúzie zo záporného a nulového gradientu G_z

Výsledky z vyhodnocovania nulového a záporného gradientu som uviedol do tabuľky 15. Pre jednotlivé veľkosti gradientu G_z (10,15,20,25)KDAC som uviedol hodnoty D difúzných koeficientov. Hodnoty štandardných odchýliek sa pohybovali od $2,79 \cdot 10^{-11}$ pri 25KDAC $1,03 \cdot 10^{-10}$ pri 10KDAC. Rádovo sa boli rovnaké ako pri zisťovaní z troch obrazov.

Tabuľka 17 - Vyhodnocovanie z nulového a záporného gradientu (G_z)				
Os Z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
sredná odchýlka	$1,03 \cdot 10^{-10}$	$5,52 \cdot 10^{-11}$	$3,91 \cdot 10^{-11}$	$2,79 \cdot 10^{-11}$
$D(\min)$ [m ² /s]	$2,06 \cdot 10^{-09}$	$2,16 \cdot 10^{-09}$	$2,21 \cdot 10^{-09}$	$2,28 \cdot 10^{-09}$
$D(\max)$ [m ² /s]	$2,50 \cdot 10^{-09}$	$2,49 \cdot 10^{-09}$	$2,46 \cdot 10^{-09}$	$2,40 \cdot 10^{-09}$
$D(\text{mean})$ [m ² /s]	$2,26 \cdot 10^{-09}$	$2,33 \cdot 10^{-09}$	$2,36 \cdot 10^{-09}$	$2,34 \cdot 10^{-09}$

V grafe č.10 sú vynesené závislosti difúzie D (difúzných koeficientov) pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu. Znovu si treba všimnúť už toľko krát opakované, že statický gradient ovplyvňuje menšie gradienty v tomto prípade G_z viac ako väčšie.

Graf č.11 Závislosť difúzie D od gradientu G_z pri vyhodnocovaní zo záporného a nulového gradientu

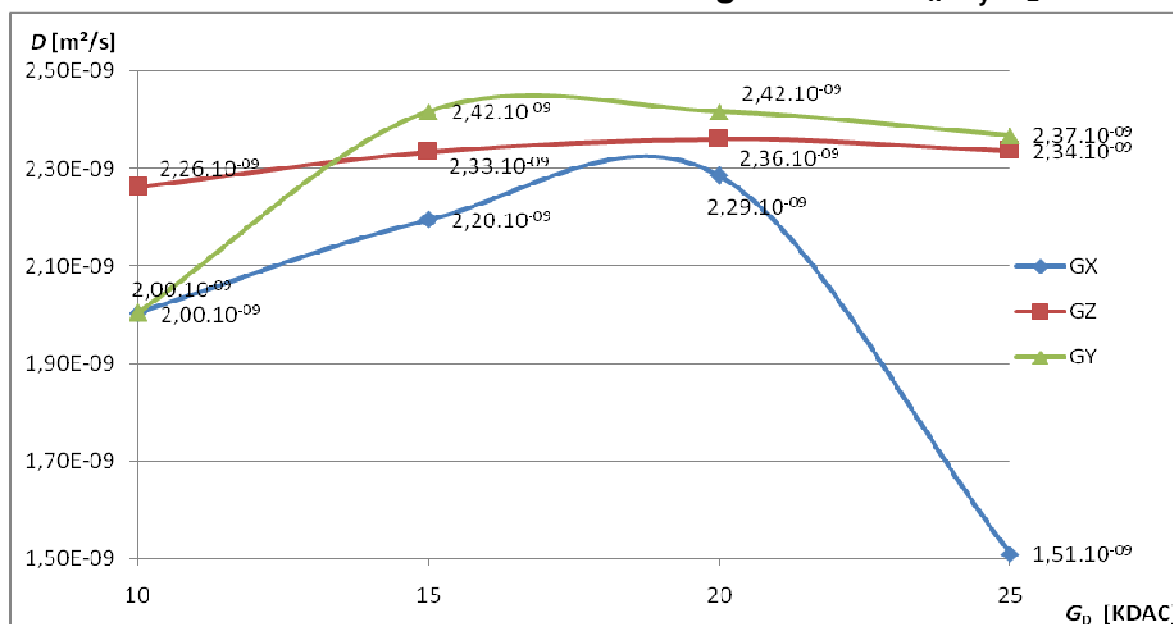


V tabuľke 18 som pre porovnanie medzi použitiami gradientov G_x , G_y , G_z súhrne uviedol ich štandardné odchýlky a stredné hodnoty difúzných koeficientov. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti pri použití 10KDAC boli spôsobené tým, že statický gradient ovplyvňuje viac menšie gradienty ako väčšie.

Tabuľka 18 - Vyhodnocovanie z nulových a záporných gradientov (G_x, G_y, G_z)				
G_x	$G_x=10$ [KDAC]	$G_x=15$ [KDAC]	$G_x=20$ [KDAC]	$G_x=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$6,96 \cdot 10^{-11}$	$5,35 \cdot 10^{-11}$	$3,47 \cdot 10^{-11}$
D(mean) [m ² /s]	$2,00 \cdot 10^{-09}$	$2,20 \cdot 10^{-09}$	$2,29 \cdot 10^{-09}$	$1,51 \cdot 10^{-09}$
G_y	$G_y=10$ [KDAC]	$G_y=15$ [KDAC]	$G_y=20$ [KDAC]	$G_y=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,62 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-10}$	$6,35 \cdot 10^{-11}$	$4,10 \cdot 10^{-11}$
D(mean) [m ² /s]	$2,00 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$2,42 \cdot 10^{-09}$	$2,37 \cdot 10^{-09}$
G_z	$G_z=10$ [KDAC]	$G_z=15$ [KDAC]	$G_z=20$ [KDAC]	$G_z=25$ [KDAC]
štandardná odchýlka	$1,03 \cdot 10^{-10}$	$5,52 \cdot 10^{-11}$	$3,91 \cdot 10^{-11}$	$2,79 \cdot 10^{-11}$
D(mean) [m ² /s]	$2,26 \cdot 10^{-09}$	$2,33 \cdot 10^{-09}$	$2,36 \cdot 10^{-09}$	$2,34 \cdot 10^{-09}$

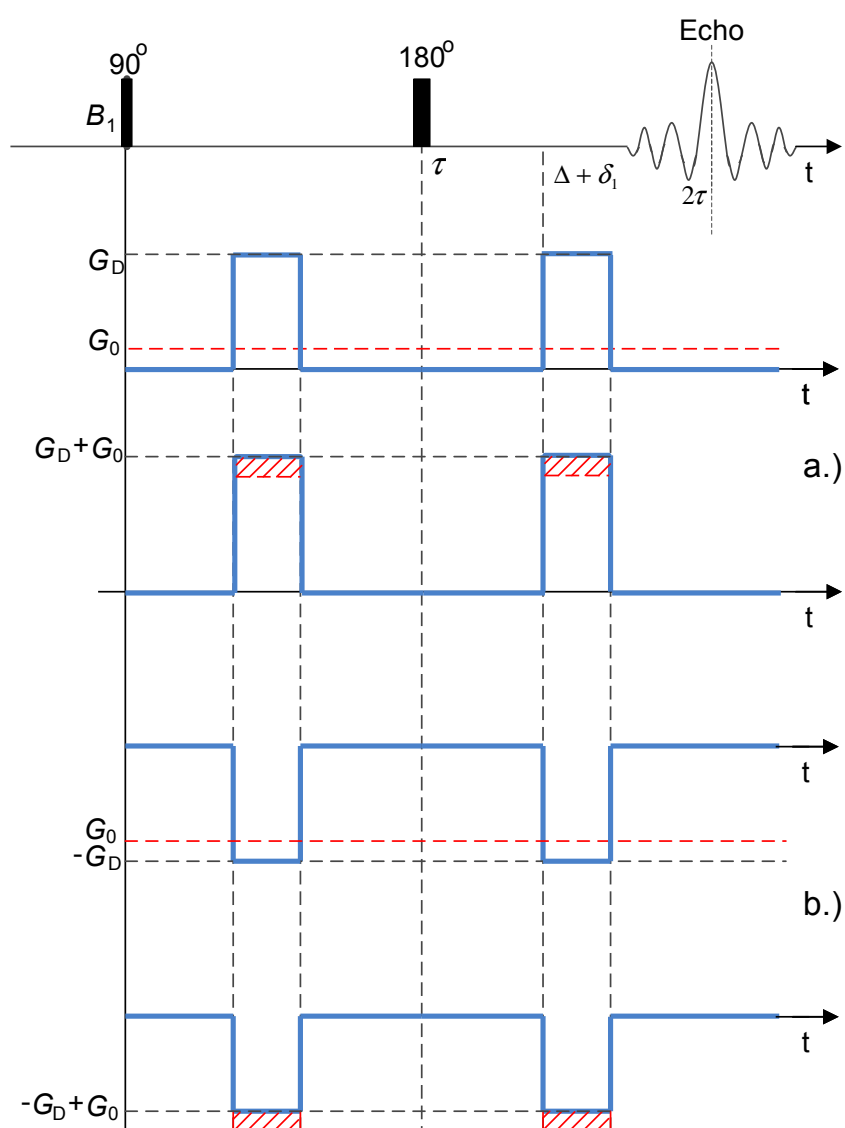
Porovnanie závislostí lepšie vyjadruje graf č.8 ako tabuľka 14. Rozptyly hodnôt difúzných koeficientov pri gradientoch G_x , G_y , G_z veľkosti 10KDAC sú v grafe č.4 jasne vidno. Náhlý pokles hodnoty difúzneho koeficientu pri použití gradientu 25KDAC G_x mohol byť spôsobený zlým odstupom signál šum

Graf č.12 Závislosť difúzie D od gradientov G_x G_y G_z



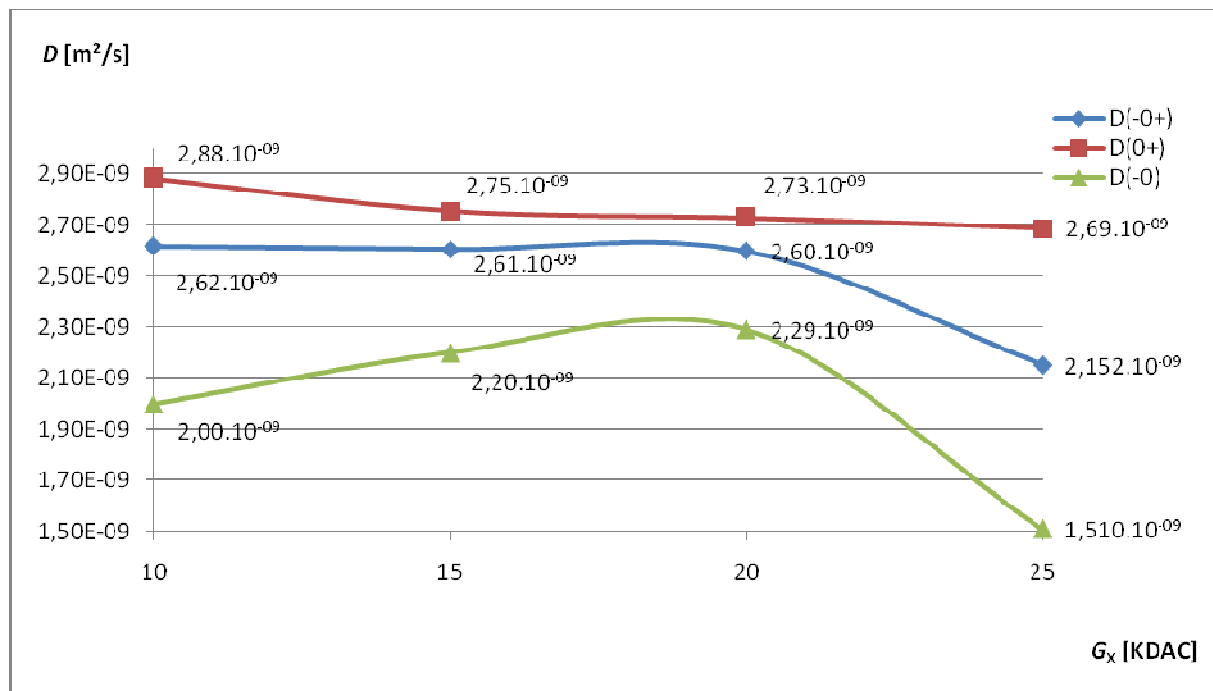
4.4.5) Porovnanie metód vyhodnocovania z troch obrazov a z dvoch obrazov

Na obr.26 za je zobrazená 6-intervalová sekvencia v ktorej sú použité kladné obdĺžnikové gradienty a **vplyv statického gradientu G_0** na kladný gradient (a.) v ktorom sa tento vplyv pričíta k difúznemu gradientu G_D a na záporný gradient (b.) v ktorom sa tento vplyv pričíta k difúznemu gradientu $-G_D$. To je **hlavný dôsledok chybovosti pri určení difúzneho koeficientu**(difúzie) pri určovaní z dvoch obrazov. Pri vyhodnotení z troch obrazov sa jednotlivé vplyvy vyrušia preto je tento spôsob určovania najvýhodnejší. Toto je aj zrejmé z grafov č.12-14. Jednotlivé značenie v legende $D(-0+)$ znamená vyhodnotenie z troch obrazov, $D(0+)$ vyhodnotenie z dvoch obrazov konkrétne meraných pri kladnom a nulovom gradiente, $D(0-)$ vyhodnotenie z dvoch obrazov konkrétne meraných pri zápornom a nulovom gradiente .



Obrázok. 27 6-intervalová PFGSE NMR sekvencia a.) kladné obdĺžnikové gradienty b.) záporné obdĺžnikové gradienty

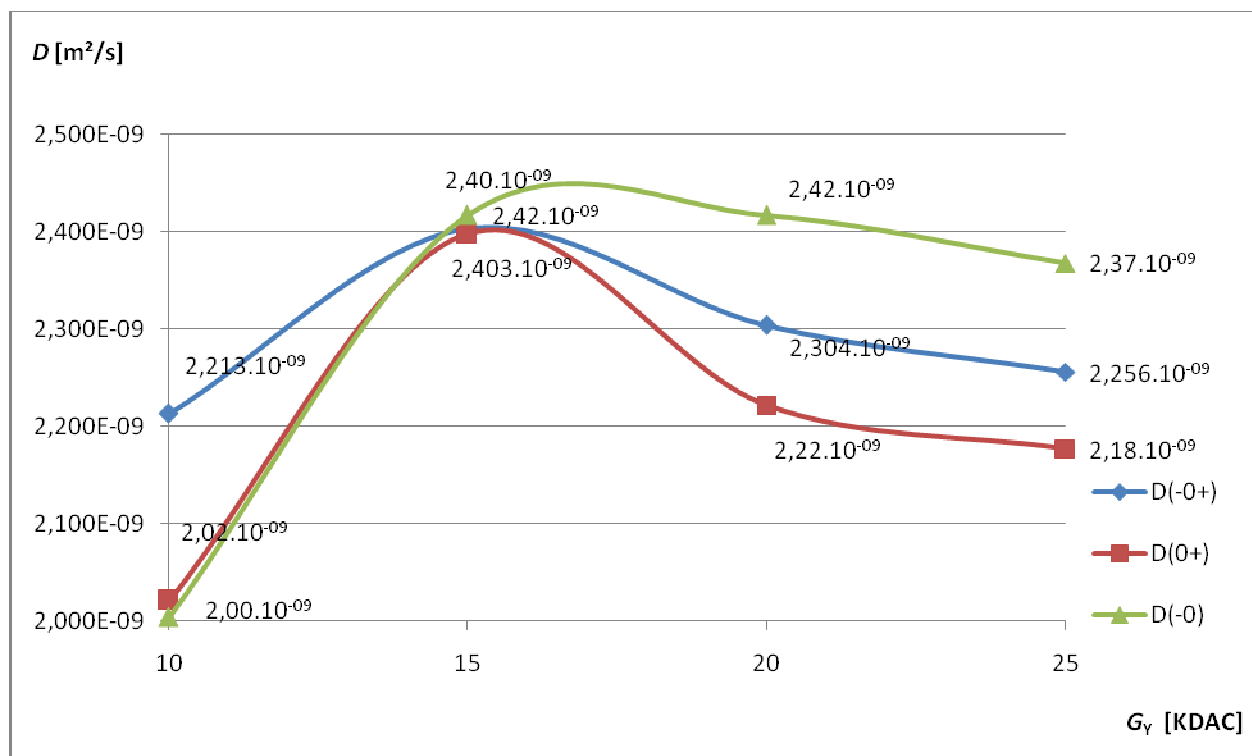
Graf č.13 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_x



V grafe č. 13 je porovnanie jednotlivých prípadov gradientov G_x . Modrou farbou sú vyznačené difúzne koeficienty získané metódou z troch obrazov červenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a kladného a zelenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a záporného. Modrý priebeh teda vyhodnotenie z troch obrazov je v strede čo len dokazuje že táto hodnota je najpresnejšia a eliminuje vplyvy nehomogénneho prostredia.

V tomto prípade je ale zistená hodnota difúzneho koeficientu $D = 2,152 \cdot 10^{-9}$ pri G_x 25KDAC ovplyvňovaná hodnotou difúzneho koeficientu $D = 1,510 \cdot 10^{-9}$ pri G_x 25KDAC, ktorá je zistená pri zápornom a nulovom gradiente, čo má vplyv na prudko klesajúcu tendenciu priebehu.

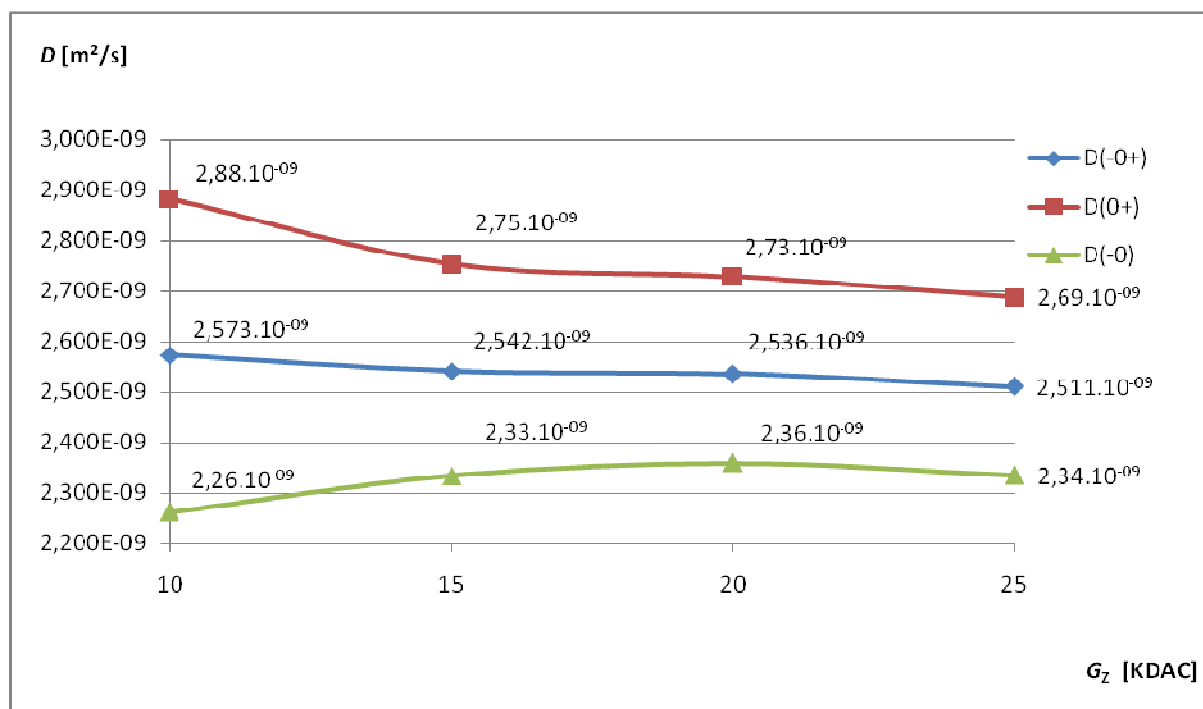
Graf č.14 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_Y



V grafe č. 14 je porovnanie jednotlivých prípadov gradientov G_Y . Modrou farbou sú vyznačené difúzne koeficienty získané metódou z troch obrazov červenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a kladného a zelenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a záporného. Modrý priebeh teda vyhodnotenie z troch obrazov je v strede čo len dokazuje že táto hodnota je najpresnejšia a eliminuje vplyvy nehomogénneho prostredia.

Napríklad ak budem skúmať hodnoty difúzných koeficientov všetkých troch prípadov pri hodnote $G_Y = 20 \text{ KDAC}$ hodnota získaná z troch meraní $2,304 \cdot 10^{-9}$ je približne priemernou z hodnôt difúzných koeficientov $2,42 \cdot 10^{-9}$ a $2,22 \cdot 10^{-9}$. Konkrétna priemerná hodnota je $2,320 \cdot 10^{-9}$ táto hodnota sa líši presne o $0,016 \cdot 10^{-9}$ od hodnoty získanej z troch meraní. Táto odchýlka mohla byť spôsobená výberom zarušenej oblasti pre výpočet v programe MAREVISI.

Graf č.15 Porovnanie jednotlivých troch prípadov gradientov G_z



V grafe č. 15 je porovnanie jednotlivých prípadov gradientov G_z . Modrou farbou sú vyznačené difúzne koeficienty získané metódou z troch obrazov červenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a kladného a zelenou farbou difúzne koeficienty z dvoch obrazov konkrétne nulového a záporného. Modrý priebeh teda vyhodnotenie z troch obrazov je v strede čo len dokazuje že táto hodnota je najpresnejšia a eliminuje vplyvy nehomogénneho prostredia.

Napríklad ak budem skúmať hodnoty difúzných koeficientov všetkých troch prípadov pri hodnote $G_z = 25 \text{ KDAC}$ hodnota získaná z troch meraní $2,511 \cdot 10^{-9}$ je približne priemernou z hodnôt difúzných koeficientov $2,69 \cdot 10^{-9}$ a $2,34 \cdot 10^{-9}$. Konkrétna priemerná hodnota je $2,515 \cdot 10^{-9}$ táto hodnota sa líši presne o $0,004 \cdot 10^{-9}$ od hodnoty získanej z troch meraní. Táto odchýlka je ešte menšia ako v predchádzajúcom prípade a znovu mohla byť spôsobená výberom zarušenej oblasti pre výpočet v programe MAREVISI.

Z jednotlivých porovnaní troch prípadov sa potvrdil teoretický poznatok, že najviac **na presnosť výsledku difúzneho koeficientu(difúzie) má vplyv veľkosť statického gradientu, veľkosť aplikovaného gradientu** čím väčší je gradient, tým je menšie ovplyvnenie výsledku a **vyhodnotenie obrazu**, konkrétne dôležité je vyhnúť sa zarušeným oblastiam.

5. Záver

Cieľom diplomovej práce bolo zoznámiť sa s princípom merania difúzií metódami NMR. Špecifikovať miesta a príčiny vzniku chýb určenia difúzných koeficientov, prípadne navrhnúť spôsob ich eliminácie.

Diplomová práca je delená na dve časti a teoretickú a praktickú časť. V prvej časti som popisoval princíp merania difúzií a to pomocou najpoužívanejšej PFG-SE NMR sekvencie merania, ktorú som konkrétne popisoval v kapitole č.2. V druhej časti experimentálnej som sa venoval najpoužívanejšej 6-intervalovej PFG-SE NMR sekvencie s kladným obdĺžnikovým a záporným obdĺžnikovým priebehom a vyhodnocovaniu difúzných koeficientov z troch obrazov a z dvoch obrazov.

V experimente pracujem so vzorkami vody. Pomocou hore uvedeného programu počítam b -faktor a difúzny koeficient a to dvomi spôsobmi. Prvý vychádza z teoretických vzťahov a hlavne zo vzťahu 4.1. Druhý vychádza z numerického výpočtu priebehu gradientu programom. Z týchto hodnôt určujem relatívne chyby medzi jednotlivými výsledkami. Tento **program je vhodný pre simuláciu vplyvu zmien parametrov merania difúzných koeficientov** a je možné simulovať napr. zmeny len jedného gradientu prípadne dobehu gradientných impulzov.

Pri kladnom obdĺžnikovom gradiente som skúmal 4 prípady. V prvej časti som skúmal relatívne chyby vzniknuté pri základných parametroch vzoriek vody a vplyv 1% zmeny (zvýšenie a zníženie) oboch gradientov G_P a G_R . Pri zvýšení alebo znížení oboch gradientov boli chyby rovnaké s porovnaním chýb vzniknutých pri nastavených základných parametrov vzorky vody. V druhom prípade som skúmal zväčšenie alebo zmenšenie o 1% jedného gradientu voči druhému vzniknuté chyby boli porovnateľné s prvým prípadom. V treťom prípade som skúmal 1% zmenu dĺžky gradientu δ vzniknuté chyby boli najnižšie zo všetkých prípadov. V poslednom štvrtom prípade som skúmal pridanie statického gradientu G_0 . Z teoretických predpokladov **statický gradient ovplyvňuje najviac chybovosť** pri zisťovaní b -faktora alebo difúzneho koeficientu. Tento teoretický poznatok sa potvrdil aj v praxi vzniknuté chyby v tomto prípade boli najvyššie. Už po pridaní $G_0 = 10^{-3}$ vznikla relatívna chyba b -faktora 8,1419% a relatívna chyba difúzneho koeficientu -7,5297% zvyšovaním statického gradientu sa chyby logicky zvyšovali.

Pri zápornom obdĺžnikovom gradiente (V tabuľke 2) sú uvedené výsledné hodnoty b -faktorov a difúzných koeficientov, veľkosti relatívnych chýb b -faktorov a difúzných koeficientov získaných pomocou programu písanom v MATLABE. V prvej časti som vyhodnocoval relatívne chyby vzniknuté pri základných parametroch vzoriek vody a vplyv 1% zmeny (zvýšenie a zníženie) oboch gradientov G_P a G_R . Vzniknuté relatívne chyby boli rovnaké ako pri použití kladného obdĺžnikového gradientu. V druhom prípade som vyhodnocoval 1% zmeny jedného gradientu voči druhému a s porovnaním s výsledkov získaných pri kladnom gradiente sa chyby nejako významne nezmenili. V treťom prípade som skúmal vplyv zmeny dĺžky gradientov chyby boli najnižšie a rovnaké ako pri použití kladného gradientu.

Použitie záporného obdĺžnikového priebehu **nemalo významný vplyv na relatívne chyby b -faktorov a difúzných koeficientov** s porovnaním s použitím kladným obdĺžnikového priebehu.

Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov spočívalo vo vyhodnotení obrazov získaných pri meraní vzorky vody so síranom. Výsledkom merania boli 3 obrazy, ktoré som program spojil do jedného a následne vyhodnocoval v programe MAREVISI. Prvý obraz bol meraný pri zápornom gradiente, druhý pri nulovom a tretí pri kladnom gradiente. Skúmal som ako sa menili hodnoty difúzných koeficientov v závislosti od veľkosti použitého gradientu a typu gradientu(záleží v ktorom smere osi x,y,z).

Vyhodnocovanie difúzie z dvoch obrazov sa odlišovalo od predošlého vyhodnocovania v tom, že k získaniu výsledného obrazu sa používali len dva obrazy a to vzniknuté pri nulovom a kladnom gradiente a zápornom a nulovom gradiente. a rovnako ako u predchádzajúceho prípadu som skúmal ako sa menili hodnoty difúzných koeficientov v závislosti od veľkosti použitého gradientu a typu gradientu(záleží v ktorom smere osi x,y,z).

Vyhodnocovanie difúzie z troch obrazov je presnejšie ako z dvoch obrazov, pretože vplyv statického gradientu na kladný a záporný gradient sa navzájom vyrušia pri troch obrazoch. Ďalším faktorom je aj veľkosť gradientu na, ktorý pôsobí statický gradient. Menší gradient je logicky ovplyvňovaný viac ako väčší.

6. Použitá literátura

- [1] STEJSKAL, E. O., TANNER, J. E. Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient. *J. Chem. Phys.* 1965, 42, pp. 288.
- [2] TANNER, J. E. Use of the stimulated echo in NMR diffusion studies. *J. Chem. Phys.* 1970, 52, pp. 2523–6.
- [3] COTTS, R. M., HOCH, M. J. R., SUN, T., MARKERT, J. T. Pulsed field gradient stimulated echo methods for improved NMR diffusion measurements in heterogeneous systems. *J. Magn. Reson.* 1989, 83, pp. 252–66.
- [4] SORLAND H. G., HAFSKJOLD, B., HERSTAD, O. A stimulated-echo method for diffusion measurements in heterogeneous media used pulsed field gradients. *J. Magn. Reson.* 1997, 124, pp. 172–6.
- [5] SUN, P. Z., SELAND, J. G., CORYB, D. Background gradient suppression in pulsed gradient stimulated echo measurements. *J. Magn. Reson.* 2003, 161, pp. 168–73.
- [6] GALVOSAS, P., STALLMACH, F., KARGER J. Background gradient suppression in stimulated echo NMR diffusion studies using magnetic pulsed field gradient ratio. *J. Magn. Reson.* 2004, 166, pp. 164–73.
- [7] SORLAND H. G., AKSNESS, D. GJERDAKER, L. 1999 A pulsed field gradient spin-echo method for diffusion measurements in the presence of internal gradients *J. Magn. Reson.* 1999, 137, pp. 397–401.
- [8] BARTUŠEK, K., GESCHIEDTOVÁ, E. MRI method of diffusion measurement in heterogeneous materials. *Measurement Science and Technology*, ISSN 0957-0233, 2008, roč. 19, s. 1-8.
- [9] MOSELEY, M.E., COHEN, Y., KUCHARCZYK, J., MINTOROVITCH, J., ASGARI, H.S., WENDLAND, M.F., TSURUDA, J. Diffusion-weighted MR Imaging of Anisotropic Water Diffusion In Cat Central Nervous System. *Radiology*. 1990, 176, pp. 435-439.

Dostupné z URL:

<<http://radiology.rsna.org/content/176/2/439.full.pdf>>

- [10] DRASTICH, A. Tomografické zobrazovací systémy 2004. kdo to vydal

- [11] BASSER, P. J., MATTIELLO, J., LEBIHAN, D., MR Diffusion Tensor Spectroscopy and Imaging. *Biophysical Journal*. 1994, 66, pp. 259-267.

Dostupné z URL:

<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1275686/pdf/biophysj00080-0261.pdf>>

- [12] ROLAND B., Basic principles of diffusion-weighted imaging. *European Journal of Radiology*. 2003, 44, pp. 169-184. Dostupné z URL:
<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6T6F-4772RT9-2&_user=640830&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1131954129&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000032308&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640830&md5=0619dcd288dcb54d83e2fe5e6eac1289>